

一种新型串联型有源电力滤波器无谐波检测控制方法

袁敞, 刘进军, 王晓钰, 李晶, 王兆安
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种新型的用于串联型有源电力滤波器(SAPF)的控制方法,这种控制方法的思路是控制由 SAPF 产生的补偿电压跟踪电源电流的 K 倍来实现电流谐波的抑制. 因为控制参考信号直接通过检测电源电流得到,无需谐波的任何信息,故提出的控制方法实际上消除了传统方法中必须的谐波检测的过程. 和传统的控制方法相比,所提出的新型控制方法更简单,易于实现,降低了系统成本,避免了由复杂的谐波计算所带来的延时,能够获得更好的谐波补偿效果. 仿真和实验结果都验证了所提出的新型控制方法的有效性.

关键词: 串联型有源滤波器;谐波检测;控制方法

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0086-04

Novel Control of Series Active Power Filter Without Harmonics Detection

YUAN Chang, LIU Jinjun, WANG Xiaoyu, LI Jing, WANG Zhao'an
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new control strategy for series active power filter (SAPF) is proposed, which attempts to control the compensation voltage injected by SAPF to trace the multiple of whole line current for achieving current harmonics suppression. Since the control reference signal is directly obtained by utilizing the detected line current without calculating harmonics, the proposed strategy actually eliminates the harmonics detection process which is indispensable for conventional control methods. Compared with the conventional control methods, the proposed control is therefore much simpler and easier to implement with lower cost, and the time delay caused by complicated harmonics calculation does not exist any more. The simulated and experimental results are presented to verify the proposed control method and the performance of SAPF.

Keywords: series active power filter; harmonics detection; control strategy

由于非线性负载的广泛使用,比如大功率晶闸管变流器、整流器以及电弧炉,使得长久以来电力系统中的谐波问题越来越严重^[1-3]. 在传统的无源滤波器后,产生了有源电力滤波器(APF)并用于解决谐波问题. 串联型有源电力滤波器(SAPF)的混合结构在 19 世纪 80 年代末被首次提出,用于抑制带大滤波电感的整流器的电流谐波^[3-6],系统框图如图 1 所示. 单一结构的串联型有源电力滤波器拓扑被用

于吸收电压型谐波负载所产生的电流谐波,如电容滤波的二极管整流电路,这样流入电网中的谐波几乎是正弦的.

从 SAPF 的控制关系到补偿性能,一直以来都是 SAPF 研究的热点问题^[5-11]. 传统的 SAPF 的控制方法需要谐波检测,控制 SAPF 为频率敏感阻抗,基波呈现零阻抗,谐波呈现高阻抗. 如果阻抗足够大,则电源电流接近于正弦. 所以,如何从电源电流

中快速正确地检测出谐波是传统控制方法的关键,因此也产生了多种多样的谐波检测算法,如快速傅里叶变换、基于瞬时无功功率理论的 p-q 变换方法等。这些算法的实现需要大量的计算,通常由数字信号处理器 (DSP) 实现^[12],提高了控制系统的成本。此外,数字实现过程额外的延时使得实际补偿效果不尽理想。这些不足限制了传统控制方法的应用。本文提出了一种新颖的 SAPF 的控制方法,无需谐波检测,实现简单,物理意义明确易于理解。本文经过详细的分析后,将给出仿真波形来验证所提出的控制方法,为进一步证明这种控制方法的效果,搭建了硬件实验平台并给出了实验结果。

理想 HPF 的特性以及数字控制上的延时。当系统参数发生变化时,这种方法的有效性值得怀疑,而且补偿效果也大打折扣,甚至系统的稳定性也不能得到保证。

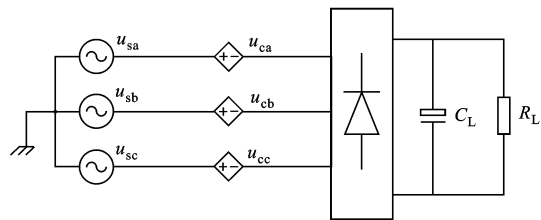
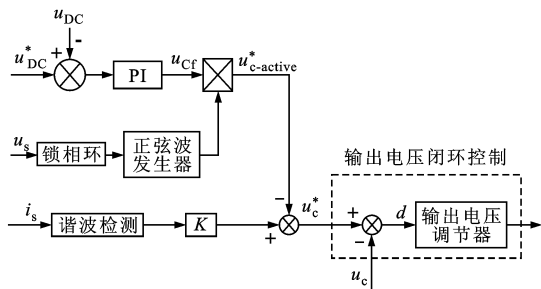


图 1 系统框图



(a) 等效电路

(b) 控制框图

图 2 SAPF 的传统控制方法

1 SAPF 的传统控制方法

SAPF 传统的控制方法基于谐波检测,在这些方法中,将 SAPF 控制为频率敏感阻抗,对于基波呈现零阻抗,对于谐波呈现高阻抗。图 2a 为系统的等效电路,图 2b 是相应的控制框图。利用高通滤波器 (HPF)、控制器检测电源电流 i_s 并计算其谐波成分 i_{sh} ,将电流谐波波形的 K 倍作为 SAPF 补偿电压的参考值,跟随参考值使 SAPF 被控制为频率敏感阻抗。为维持变流器直流侧电压恒定,用直流侧电压反馈控制来维持 SAPF 交流侧和直流侧功率平衡。

在这些控制方法中,HPF 的性能非常重要。迄今为止,人们已经在这个领域展开了深入的研究并提出了很多算法,比如快速傅里叶变换、基于瞬时无功理论的 p-q 法等。这些谐波检测算法中大多数需要很大的计算量,并且通常由高成本的 DSP 来实现。尽管 DSP 的计算速度很快,它仍然难以实现理想高通滤波器的性能。非理想滤波器给待滤波的信号带来相位上的延时,导致补偿效果不够理想。在工程实际中,很多情况下谐波源是固定的,待滤波信号也是周期性的,因此通常用前一周期所得到的信息就可以变相获得相位超前,这种替换可补偿由于非

2 SAPF 的新型控制方法

为了解决上述问题,有两种方案:

(1) 设计更好的滤波器,如自适应滤波器、神经网络控制等^[13-14];

(2) 从控制系统中去除谐波检测环节。

第一种方案意味着更高的系统成本,本文所提出的新型控制方法基于第二种方案。在所提出的控制方法中,补偿电压的参考由两部分组成

$$u_c^*(t) = u_c'(t) + u_c''(t) \quad (1)$$

首先,式(1)控制信号的第一部分是负载电流全分量的倍数,由于去除了高通滤波器,SAPF 不需要复杂的运算单元

$$u_c'(t) = Ki_s(t) \quad (2)$$

若补偿电压仅等于控制信号的第一部分 $u_c'(t)$,理论上电源电流的谐波将被消除。但是,这样补偿电压将含有大量的基波分量,故 SAPF 将类似一个真实的电阻,吸收大量的有功。由于整个电路将运行于一种非正常状态,直流侧电压将迅速升高,故加入参考信号的第二部分来平衡有功。通常这部分的调节器选用 PI 调节器,因此获得的参考信号的时域表达为

$$u_c''(t) = -[K_P(u_{DC}(t) - u_{DC}^*) + K_I \int (u_{DC}(t) - u_{DC}^*) dt] \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中: K_P 、 K_I 是 PI 调节器的比例系数和积分系数; $u_{DC}(t)$ 表示直流侧电压瞬时值; u_{DC}^* 表示直流侧电压的参考值; $\sin(\omega t + \varphi)$ 表示与电源电压同相位的单位正弦量. 该控制信号保证 SAPF 的直流侧电压恒定, 所以 SAPF 不会从电源吸收有功功率, 可以正常运行.

图 3 表示新型控制方法的控制策略, 整个控制律为

$$u_c^*(t) = K i_s(t) - [K_P(u_{DC}(t) - u_{DC}^*) + K_I \int (u_{DC}(t) - u_{DC}^*) dt] \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

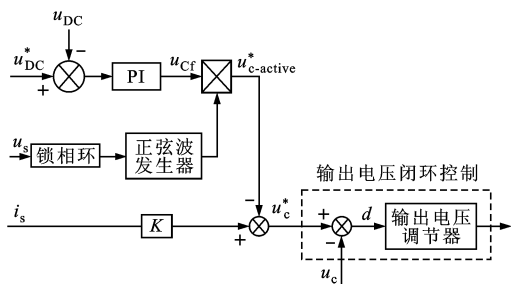
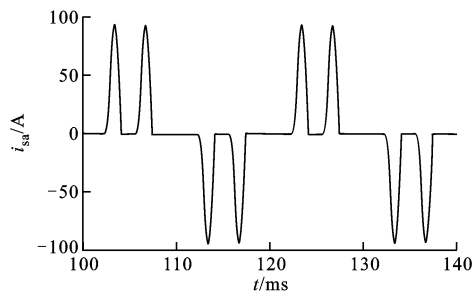


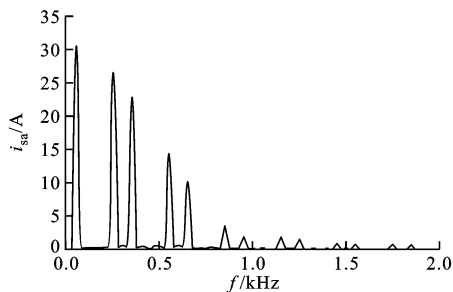
图 3 新型控制方法的控制框图

3 仿真结果

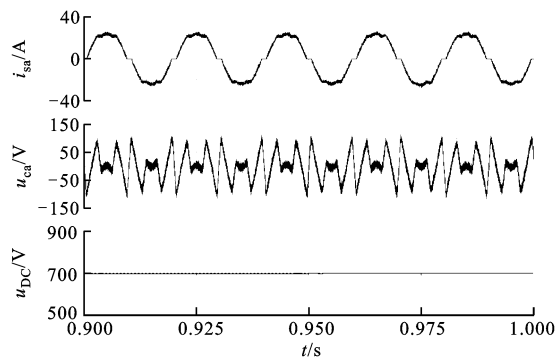
基于图 1 中 SAPF 的结构框图, 搭建仿真系统以验证控制策略的有效性. 仿真系统中电源为三相正弦电压源, 线电压有效值为 380 V, 负载为三相二极管整流桥带阻容负载, 直流侧滤波电容为 1 000 μ F, 负载电阻为 20 Ω . SAPF 由三相电压型 PWM 变流器、直流侧电容、输出开关次滤波器和耦合变压器构成. 直流侧电容为 1 000 μ F, 输出滤波电感为 1 mH, 滤波电容为 100 μ F, 阻尼电阻为 10 Ω , 耦合变压器变比为 1. 图 4a 是补偿前的电源电流, 仿真结果见图 4, 计算获得补偿前电流的总谐波畸变率(THD)为 61%. 从上至下, 通道 1 为补偿后的电源电流, 通道 2 为 SAPF 输出的补偿电压, 通道 3 为 SAPF 直流侧电压. 直流侧电压的指令值为 700 V, 补偿后电源电流总谐波畸变率为 3.4%, 谐波抑制效果明显. 图 4d 是在 1 s 时二极管整流桥直流侧突加负载时的动态响应, 1 s 时刻直流侧并联一个 100 Ω 电阻来产生负载扰动. 新的控制方法能够稳定运行, 抑制负载扰动的影响, 并在动态过程中保



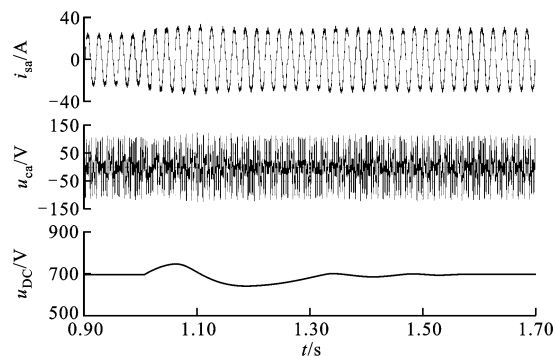
(a) 补偿前的电源电流



(b) 补偿前电源电流的频谱



(c) 稳态补偿特性



(d) 直流侧电压有扰动时补偿效果

图 4 仿真结果

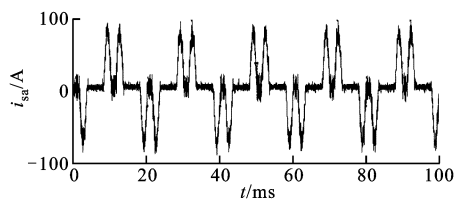
持满意的补偿性能. 仿真结果验证了所提出的新控制方法的有效性, 在稳态和动态时均可有效抑制电

流谐波。

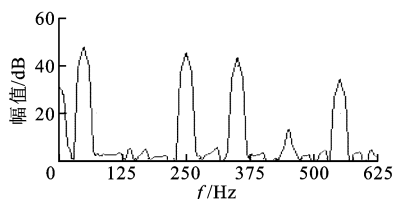
4 实验结果

为了验证所提出新型控制方法的性能,搭建了15 kV·A 硬件实验平台,实验系统电路拓扑如图1所示。实验系统参数与仿真系统相同。电源为三相正弦电压源,线电压有效值为380 V,负载为三相二极管整流桥带阻容负载,直流侧滤波电容为1 000 μ F,负载电阻为20 Ω ,SAPF 直流侧电容为1 000 μ F,输出滤波电感为1 mH,输出滤波电容为100 μ F,阻尼电阻为10 Ω ,耦合变压器变比为1。

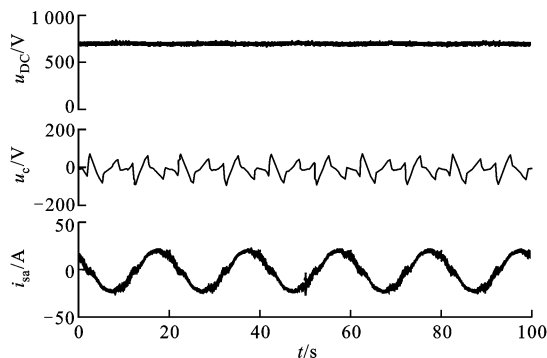
图5a、图5b是补偿前电源电流波形及频谱,电源电流畸变明显,谐波含量很大。图5c是补偿后实验结果,补偿后电源电流总谐波畸变率为3.7%,电源电流谐波得到抑制,波形明显改善,接近正弦。由此说明了采用新型控制方法后串联型有源电力滤波器的运行有效。



(a) 补偿前的电源电流波形



(b) 补偿前的电源频谱



(c) SAPF 采用新控制策略时的补偿电压和电源电流

图5 实验结果

5 结论

对于串联型有源电力滤波器的传统控制方法进行回顾后,本文提出了一种新型控制方法,即无需负载电流谐波检测的控制方法。该控制方法直接用电源电流作为补偿电压信号的控制参考,根据理论分析,此时 SAPF 仍能有效地抑制电源电流中的谐波。仿真结果显示了不同工作状态下该方法均能有效抑制电流谐波。搭建了硬件实验平台来验证这种新的控制方法,给出了 SAPF 系统的稳态运行实验结果,进一步说明了这种方法的有效性。因此,在谐波抑制和电能质量改善方面,在不影响补偿性能的前提下,采用本文所提到的新型控制方法的串联型有源电力滤波器具有控制系统简单、低成本等优点。

参考文献:

- [1] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Trans Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [2] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [3] PENG F Z, AKAGI H, NABAE A. A new approach to harmonic compensation in power system [C] // IEEE-IAS Conference Record. Piscataway, NJ, UAS: IEEE, 1988: 874-880.
- [4] PENG F Z, AKAGI H, NABAE A. Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters[J]. IEEE Trans Industry Applications, 1993, 29(1): 144-152.
- [5] PENG F Z, ADAMS D J. Harmonic sources and filtering approaches[C] // Proceedings of IEEE IAS Annual Meeting. Piscataway, NJ, UAS: IEEE, 1999: 448-455.
- [6] 姚为正,刘进军,王群,等. 采用检测电源电流控制方式的串联型电力有源滤波器[J]. 西安交通大学学报, 1999, 31(10): 1-5.
YAO Weizheng, LIU Jinjun, WANG Qun, et al. Series active power filter based on control method for detecting source current[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 31(10): 1-5.
- [7] DIXON J W, VENEGAS G, Merán L A. A series active power filter based on a sinusoidal current-controlled voltage-source inverter[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1997, 44: 612-620.
- [8] MORAN L A, PASTORINI I, DIXON J, et al. A fault protection scheme for series active power filters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(5)

- 928-938.
- [9] LI R, JOHNS A T, ELKATEB M M. Control concept of unified power line conditioner[C]//Proceedings of IEEE PES Winter Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000;2594-2599.
- [10] WANG Z, WANG Q, YAO W, et al. A series active power filter adopting hybrid control approach[J]. IEEE Trans Power Electron, 2001,16;301-310.
- [11] YAO Weizheng, WANG Qun, LIU Jinjun, et al. An instantaneous detecting approach of harmonic voltage for the series active power filter[C]//IEEE Proceedings of Power Cont. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998; 1533-1536.
- [12] 高亮,蒋平,徐浩. 基于 DSP 数字式控制在 SAPF 的实现[J]. 电力自动化设备,2001(12):13-15.
- GAO Liang, JIANG Ping, XU Hao. Application of DSP-based digital control in SAPF[J]. Electric Power Automation Equipment,2001(12):13-15.
- [13] CHEN Y M, O'CONNELL R M. Active power line conditioner with a neural network control[J]. IEEE Trans Industry Applications, 1997,33(4):1131-1136.
- [14] LIM C M. Adaptive control of discrete systems using neural networks[J]. Proc Inst Elect Eng, 1995,142(5):526-528.

(编辑 杜秀杰)