

并联型电力有源滤波器的启动特性研究

程汉湘 顾媛媛 刘 艺

(广东工业大学自动化学院 510090)

摘 要 阐述了并联型电力有源滤波器 (SAPF) 启动时变流器直流侧电压、电流过冲的问题及其危害, 并提出了采用 PI 控制器控制变流器直流侧电压软启动的解决方案, 最大限度地降低装置启动瞬间的冲击电压、电流。文章给出了相应的理论分析和仿真结果, 并根据仿真结果进行了试验。试验证明采取该方法能有效地降低 APF 装置启动时变流器直流侧的电压、电流冲击, 确保了 APF 装置在系统中长期安全运行的可靠性。

关键词 有源滤波器 启动特性 逆变器直流侧电压

1 引言

随着电力电子器件在电网中的广泛应用, 电网的谐波污染日益严重, 由谐波引起的各种故障和事故不断发生, 传统无源滤波的弊病日益显现。自日本学者赤木泰文等人提出“三相电路瞬时无功功率理论”以来, 有源滤波器的研究逐渐趋向实用化。

在有源滤波器的研制过程中, 主电路拓扑结构、谐波电流检测方法、控制方法等都是目前研究的重点内容。目前关于有源滤波器的控制策略很多, 包括空间矢量控制、滞环电流比较控制、单周控制、无差拍控制、滑模控制、模糊控制等^[1-6]。本文在确定所研制并联型配电网用有源滤波启动器的电路结构和控制策略后, 针对研制过程中出现 APF 装置启动时产生的变流器直流侧电压冲击过大, 造成装置不能正常投入运行以及可能造成电力电子器件损坏问题进行了分析, 提出了对变流器直流侧电压进行软启动的控制方案。

用 i_p 、 i_q 运算方式^[6]对三相电流谐波和无功电流进行实时检测。通过对三相负载电流和 A 相电压的变换计算, 可在具体电路控制设计时根据需要检测谐波电流或谐波电流与无功电流之和, 从而达到只补偿谐波或者同时补偿谐波和无功的目的。其具体分析参见文献 [7]。应用瞬时无功功率理论的谐波检测方法可以较好地检测出负载谐波电流, 从而为补偿电流的产生提供准确的指令信号。

2 并联型 APF 的工作原理及谐波电流检测

并联型电力有源滤波器主要由两部分组成, 即指令电流运算电路和补偿电流发生电路 (电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路三个部分构成)。其滤除谐波及补偿无功功率的原理参见文献 [5-7]。由于有源滤波器输出的电流是完全可控且响应时间为毫秒级, 因此采用有源滤波器可以较好地解决非线性负荷的动态谐波电流和动态无功电流问题^[6-7]。本文中研制的 APF 原理图如图 1 所示。

本文以三相电路瞬时无功功率理论为基础, 采

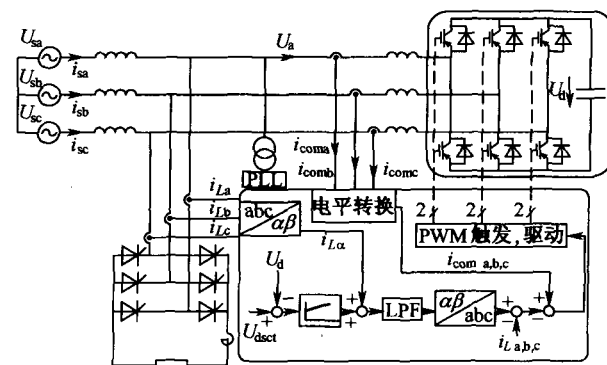


图 1 有源滤波器系统原理图

3 控制策略

在上述基础上为了实现较好的补偿电流跟随性能, 还需要对变流器直流侧电容的电压进行适当的控制。对直流侧电压的控制可由指令电流运算电路和补偿电流发生电路结合实现。将直流侧反馈电压 U_{cr} 与给定电压值 U_{cr} 的差值经 PI 调节后的调节信号 Δi_p 叠加到瞬时有功电流的直流分量上, 经运算在指令信号中包含一定的基波有功电流, 补偿电流

发生电路根据指令电流产生补偿电流注入电网,使有源滤波器的补偿电流中包含一定的基波有功电流分量,从而使有源滤波器的直流侧与交流侧交换能量,将直流侧电压调节至给定值^[6-9]。

结合上述内容,本文确定了有源滤波器的电压、电流控制策略:指令运算电路从负载电流中分离出负载电流的直流基波分量,经与变流器直流侧电压的控制量相加后送入电流反变换电路,则可得负载电流的基波分量;负载电流与所得基波分量相减后的结果即为负载谐波电流,将其与 APF 的实际补偿电流进行比较后通过比例环节输送到 PWM 波发生器,并以 PWM 波控制变流器实时产生所需的谐波电流,从而最终使得系统电流接近正弦波,以达到谐波滤除和无功补偿的目的。系统具体控制图如图 1 所示。

4 APF 启动过程出现的问题及其解决方法

根据上述内容,本文研制了配电网用并联型有源滤波器样机。在实际系统研制试验期间发现,当有源滤波装置投入运行的瞬间,变流器直流侧电压、电流会出现较大的冲击。经过仿真和实验可知,直流侧电压变化过程若处理不当,该电压会出现一个较大的冲击后才稳定在设定值,在实验过程中发现该冲击电压、电流可达到初始值的 300% 以上,如图 2 所示。该现象对于变流器的电力电子元件造成了比较大的危险,试验过程中就出现了因为冲击电压超过变流器模块耐压范围而导致模块爆炸的现象。此外中间电压在瞬间过高,会导致 IGBT 器件产生因过电压而报警的现象,致使补偿装置不能正常投入运行。

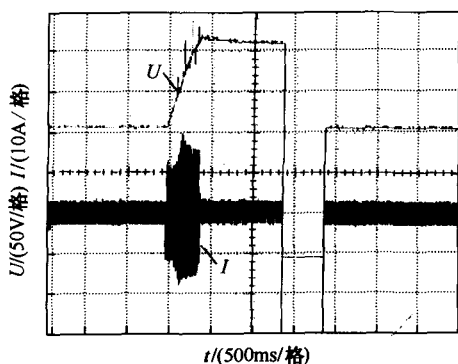


图 2 启动时直流侧电压过高导致装置报警
由有源滤波器的原理可知,直流侧电容的平均

电压的变化能够反映出主电路与负载间功率的转换情况。其关系为

$$P_t = CU_d \frac{dU_d}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_t &= \frac{1}{T} \int_0^T P_t dt = \frac{1}{2T} C [U_d^2(T) - U_d^2(0)] \\ &= \frac{C}{2T} \cdot \Delta U_d^2 \end{aligned} \quad (2)$$

在此基础上可推导出

$$I_s = \frac{2}{U_s} \left[\bar{P}_t - \frac{C}{2T} \cdot \Delta U_d^2 \right] \quad (3)$$

$$\Delta U_d^2 = \frac{U_s T}{C} \left[\frac{2\bar{P}_t}{U_s} - I_s \right] \quad (4)$$

式中, P_t 为有源电力滤波器传输的瞬时有功功率; C 为直流侧电容; U_d 为直流侧电容电压; \bar{P}_t 为有源电力滤波器传输的瞬时有功功率的平均值; T 代表一个开关周期; $U_d(0)$ 、 $U_d(T)$ 分别是 $t=0$ 和 $t=T$ 的直流侧电容电压; ΔU_d^2 是 $t=0$ 和 $t=T$ 的直流侧电容电压的平方差。

由以上推论可知系统侧电流 I_s 可以由直流侧电容电压 U_d 的变化量确定。为使有源电力滤波器正常工作,达到预期的补偿效果,直流侧必须有足够高的电容电压 U_d 并保持稳定,以保证在动态补偿的任何瞬间都能根据控制要求输出所需的补偿电流;但由于补偿电流的时变性和变流器的自身损耗,如不采取适当的控制措施,直流侧电容电压 U_d 将发生衰减或很大的波动,造成变流器不能正常运行。

实验过程中当 APF 滤波装置启动时,由于直流侧电压突然由未投入装置时的稳定值在极短的时间内上升至设定值,从而造成了较大的 ΔU_d 。由以上可知变流器直流侧电压较大的变化值将导致 I_s 发生突然的跃变,实验波形证实 I_s 的变化量可达到稳定值的三倍以上;节点电压也会突然下降,产生一个明显的下凹变化,而且这个暂态过程还持续 1s 以上的时间。显然,这样一个很大的启动过程将影响系统的稳定,或者降低系统的稳定裕量,导致装置不能正常投入或变流器器件发生故障。

因此,本文考虑采取减小装置启动瞬间直流侧电压变化量 ΔU_d 的方法。具体做法是采用 PI 控制器将装置运行时的直流侧电容电压维持在要求的水平;装置启动时将变流器直流侧电压 U_d 与一较低设定的电压参考值 U_{ref} 进行比较,并将比较结果送

入PI控制器，PI控制器的输出就是电源侧电流期望的幅值 I_s ，也即负载侧电流基波有功分量的幅值。在装置启动的一段时间内，设定的电压参考值 U_{ref} 逐步由较低值按照启动时间段的设定增加到稳态设定值。对该方法的实际应用效果，下面给出了仿真和试验结果。

4.1 仿真结果

针对上述 APF 启动期间出现的问题，本文通过 Matlab/Simulink 进行了仿真和实验研究。直流侧电压设定值在启动 1s 时间内按照阶梯方式逐步增加到稳定设定值的仿真波形和没有变化过程直接到设定值的直流电压波形如图 3 所示。

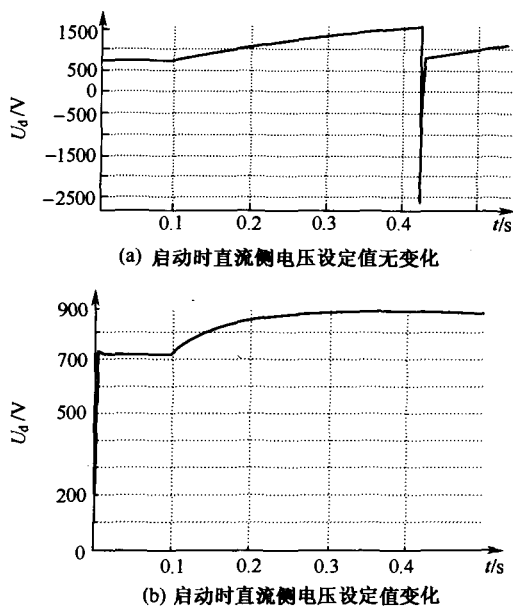


图3 变流器直流侧电压波形

由仿真波形可知如直流侧电压设定值在启动时直接一步到位，将使得直流侧电压持续上升至初始电压的两倍以上，直至超过变流器的额定电压，导致电力电子器件发生故障；而采取直流侧电压设定值在启动开始的一段时间内按照阶梯方式逐步增加到稳定设定值的方法，会有效减小启动过程对系统的扰动，降低装置启动时刻直流侧电压和系统电流的冲击值，使装置能够正常投入运行，加强系统的稳定性。至于每个给定电压的持续时间则应视系统参数情况而定。

4.2 实验结果

根据以上叙述，在 380V 电压下，对控制系统进行了装置启动试验，以考察启动过程对系统的影响。图 4 为试验系统构成结构图。图 5 是经过参数优化后

在 380V 线电压作用下滤波装置的启动工作动态波形，直流电压的过冲在 150ms 内由初始值的 537V 上升到 645V，为初始值的 120%。相对于直接启动的控制来讲，显然，采用直流侧电压变化控制的策略能够有效降低直流电压的波动，而且也大大减少线路电流的冲击，从波形可以看出最大的冲击电流大约为稳态值的 190%，暂态过程的持续时间有了明显的缩短。

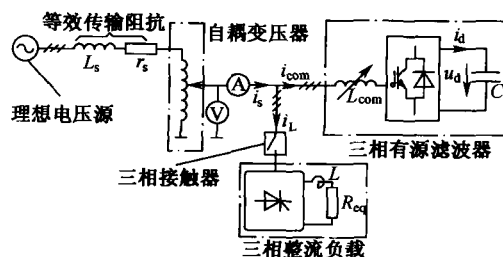


图4 实验系统结构图

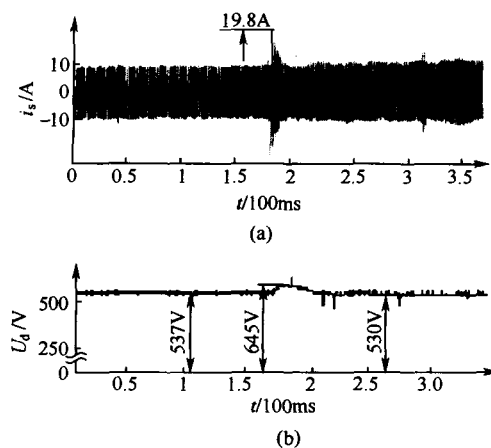


图5 直流侧电压、电流波形

图 6 为当负载为整流电路、系统在 380V 三相电压作用下，投切滤波装置后系统电流波形。由图 6 可见，装置投入时系统立即起到谐波补偿作用；装置的启动对系统没有太大的影响，启动时电流的冲击幅值大约为负载电流峰值的两倍，若以基波电流的有效值来分析，则电流的最大冲击就只有 1 倍多了。此外，过渡过程也比较平稳，暂态过程大约持续 8 个周波左右，即大约持续 160ms 以内的时间。

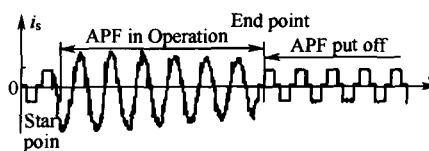


图6 装置投切时系统电流波形

由图 7 可以看出,在装置稳态运行时,系统输出电流已经比未投入装置时的系统方波电流有了明显改善。由此可见,有源滤波装置基本上吸收了绝大部分的谐波电流,使系统电流中的谐波含量得到了有效抑制。

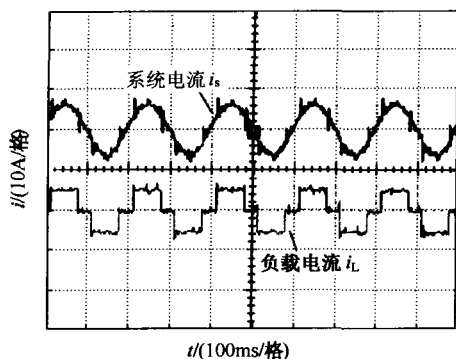


图 7 稳态运行时负载电流、系统电流

5 结束语

本文针对有源滤波器投入运行时易导致变流器直流侧电压过冲而导致装置不能正常运行的情况,提出了启动时采用控制直流电压软启动的方法。采用该方法的装置已经过多次试验,试验结果证明,该方法能有效地减少装置启动时变流器直流侧电压、电流的冲击,增加系统的稳定性,且滤波效果良好,符合国家标准。

参考文献

- [1] Shoji Fukuda, Takehito Yoda. A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (3): 888 - 895.
- [2] 谢运祥,朱立新,唐中琦. 电力有源滤波器及其应用技术的发展 [J]. 电工技术杂志, 2000, 19 (4): 1 - 3.
- [3] 曾繁鹏,王建曠,伏祥运,等. 基于系统电流检测的

并联有源电力滤波器数字控制方法 [J]. 电网技术, 2005, 29 (24): 50 - 53.

- [4] Claro C A, Kaffka J, Campos A. A fully digital control employing a deadbeat technique for active power filters [C]. 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1999, 1: 143 - 148.
- [5] 刘国海,薛文平. 基于改进型谐波检测方法的并联型有源滤波器的闭环控制 [J]. 东南大学学报, 2005 (11): 117 - 121.
- [6] 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, 2002.
- [7] 姜齐荣,谢小荣,陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [8] 梅红伟,钟奇,张金波. 有源电力滤波器直流侧电容电压的稳定控制 [J]. 河海大学常州分校学报, 2005, 19 (4): 27 - 29.
- [9] 范瑞祥,罗安,李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (2): 106 - 111.

The Start-Up Characteristic Research of Shunt Active Power Filter

Gu Yuanyuan

(Guangdong University of Technology)

Abstract The problem which is caused by the over impact of the DC side voltage and current in shunt active power filter is presented. The mild start-up of DC side voltage based on digital PI (Proportional and Integral) makes the problem solved. Here, the theoretical analysis and simulation results of the proposed method are given in details. The results from simulation and tests verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords active power filter start-up characteristic DC side voltage of converter

收稿日期: 2006-05-25

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎投放广告