

并联型 APF 的一种简单 PI 补偿控制方法

杨用春¹, 赵成勇¹, 李广凯²

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 南方电网技术研究中心, 广州 510623)

摘要: 利用所建立的并联型 APF 在三相坐标系下的数学模型, 通过分析发现常规 PI 控制下的并联型 APF 电流闭环传递函数中存在一个周期性的干扰信号, 对系统的跟踪控制性能有显著的影响。为了消除干扰、改善系统的性能, 采用补偿的方法构成新的 PI 控制系统, 并在 EMTDC/PSCAD 环境下进行了仿真。结果表明, 该补偿 PI 控制方法提高了 APF 的电流跟踪性能。

关键词: APF; 电流跟踪; PI 控制; 补偿

A Simple Compensatory PI Control on Shunt APF

YANG Yongchun¹, ZHAO Chengyong¹, LI Guangkai²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: With the mathematic model of shunt APF in three-phase stator coordinates set up in this paper, it is found by calculation analysis that there is a period disturbing signal in the current closed loop transfer function of the general PI control, and the disturbing signal influences the performance of current track distinctly. In order to eliminate the disturbing signal and improve the system performance, a new PI control based on compensation is put forward, and the simulation with EMTDC/PSCAD is carried out. The results show that compensatory PI control can enhance the current track performance of APF.

Key words: APF; current track; PI control; compensation

电网中的谐波污染危害着电力系统的安全运行, 也给用户带来巨大的损失。传统无源滤波装置由于存在缺陷, 很难达到理想的滤波效果, 所以有源电力滤波器(APF)现在已经成为谐波治理领域的一个研究热点^[1-2]。

APF 控制系统主要包括谐波电流检测和电流跟踪控制两部分。在电流跟踪控制技术方面, 应用得比较广泛的主要是滞环电流比较和三角波比较电流控制的方法, 这两种方法分别代表电流控制和 PWM 产生在一起和分开的方法。由于电流控制和 PWM 产生分开会带来很多的好处, 近年来采用三角波比较电流控制的这类方法或者将其他电流控制和 PWM 产生在一起的方法加以改进, 使之也能单独产生 PWM 波, 成为研究的主流^[3]。

PI 电流控制是在工程中经常采用而且被实践证明是非常有效的一种方法, 基于三相静止坐标系下的 PI 控制方法由于其物理概念明确、实现简单而被广泛使用^[4-5]。

本文首先分析了并联型 APF 的基本原理, 其次为进一步研究其控制策略, 采用状态空间平均法推导了 APF 的数学模型, 接着分析传统常规 PI 控制下的影响系统控制性能的因素, 发现 APF 电流闭环传递函数中存在一个周期性的干扰信号, 这对系统的跟踪控制性能有很大的影响。为了消除干扰, 改善系统的性能, 提出了采用了补偿的方法来构成新的 PI 控制系统来, 最后在 EMTDC/PSCAD 中进行了仿真, 结果表明该补偿 PI 控制确实提高了 APF 的电流跟踪性能。

1 并联型 APF 的运行原理

图 1 所示为并联型 APF 系统结构原理图^[6-9]。图中 u_s 表示交流电网电压, 负载为谐波电流源。

基金项目: 华北电力大学青年教师科研基金 (200811001); 华北电力大学重大项目预研基金 (93301703)。

Foundation item: Grand project Pre-research Foundation of North China Electric Power University (93301703); the Young Teacher's Research Foundation of North China Electric Power University (200811001)。

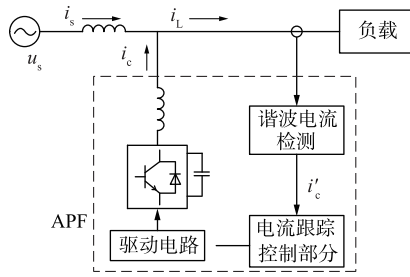


图 1 并联型 APF 系统原理图
Fig. 1 Principle Diagram of Shunt APF

并联型 APF 系统由主电路 (包括驱动电路) 和控制两大部分组成, 其中控制部分又由谐波电流检测部分和电流跟踪补偿部分组成。主电路采用 PWM 变流器。作为主电路的 PWM 变流器, 在产生补偿电流时, 主要工作于逆变状态, 因此, 有的文献中将其称为逆变器。但它并不仅仅是作为逆变器而工作的, 在电网向有源电力滤波器直流侧储能元件充电时, 它工作在整流状态。也就是说, 它既工作于逆变状态、也工作于整流状态, 且两种工作状态无法严格区分。并联型有源电力滤波器的基本工作原理是通过检测电路检测负载电流, 经指令运算电路计算出补偿电流的指令信号, 然后由补偿电流发生电路产生补偿电流, 补偿电流与负载电流中需要补偿的部分相抵消, 最终得到期望的电网电流。

APF 检测出负载电流 i_L 的谐波分量为 i_{Lh} , 将其作为补偿电流的指令信号 i'_c , 由补偿电流发生电路产生与负载电流中的谐波分量 i_{Lh} 大小相等的补偿电流 i_c , 补偿电源电流中的谐波分量, 使电源电流 i_s 中只含基波, 达到抑制电源电流中谐波的目的。上述原理可用如下的一组公式进行描述。

$$i_s = i_L - i_c, \quad (1)$$

$$i_L = i_{L1} + i_{Lh}, \quad (2)$$

$$i_c = i_{Lh}, \quad (3)$$

$$i_s = i_L - i_c = i_{L1}. \quad (4)$$

式中 i_{L1} 为负载电流的基波分量。

如果要求并联型有源电力滤波器在补偿谐波的同时, 补偿负载的无功功率, 则只要在补偿电流的指令信号中增加负载电流的基波无功分量 i_{L1q} 成分即可。这样, 电源电流等于负载电流的基波有功分量 i_{L1p} 。则前面给出的描述公式需要做以下调整:

$$i_U = i_{L1p} + i_{L1q}, \quad (5)$$

$$i_c = i_{Lh} + i_{L1q}, \quad (6)$$

$$i_s = i_L - i_c = i_{L1p}. \quad (7)$$

2 APF 的数学模型

APF 主电路的核心部分实际上为一个三相逆变器 (见图 2)。三相逆变器可看成是三个输出电压相位互差 120° 的单相半桥逆变器的组合, 所以可以采用单相半桥式电路来分析三相 APF 主电路的模型^[10-11]。

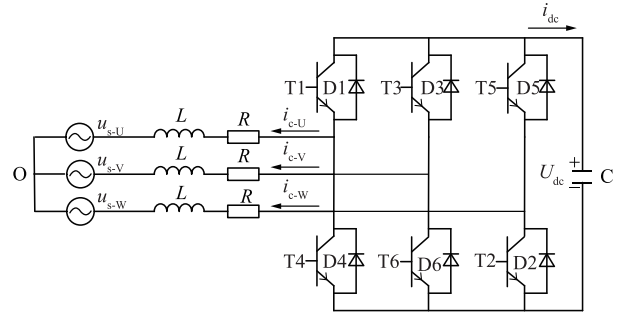


图 2 三相三线并联型 APF 主电路

Fig.2 Main Circuit of Shunt APF in Three-phase Three-wire

在逆变电路中, PWM 波是不连续状态, 分析时采用状态空间平均法建立连续的状态平均模型。状态空间平均法是基于开关频率远远高于输出频率的情况下, 在一个开关周期内, 可用变量的平均值代替其瞬时值, 从而得到连续状态空间平均模型。下面以 U 相为例, 以 u_{s-U} , L , R , T1, T4, D1, D4 及 U_{dc} 组成的单相半桥电阻来推导三相坐标系下 APF 的数学模型。

设 U 相桥臂侧输出的电压为 u_{r-U} , 双极性 SPWM 调制时, u_{r-U} 可表示为

$$u_{r-U} = \frac{U_{dc}}{2}(2S - 1). \quad (8)$$

式中 S 为开关函数。当 T1 (或 D1) 导通时, $S = 1$; 当 T4 (或 D4) 导通时, $S = 0$ 。显然由于开关函数的存在, u_{r-U} 是不连续的, 对其求开关周期的平均值, 得到

$$\bar{u}_{r-U} = \frac{U_{dc}}{2}(2\bar{S} - 1). \quad (9)$$

S 的开关周期平均值 \bar{S} 即为上桥臂导通的占空比 D , 由图 3 可得

$$D = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{u_{ref}}{U_{tn}} \right). \quad (10)$$

式中: u_{ref} 为参考正弦波信号; U_{tn} 为三角载波峰值。将式 (10) 代入式 (9) 中得

$$\bar{u}_{r-U} = \frac{U_{dc}}{2} \frac{u_{ref}}{U_{tn}}. \quad (11)$$

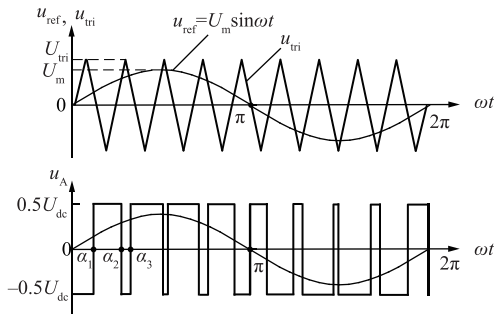


图3 SPWM 调制形成

Fig. 3 SPWM Forming

因此，从调制信号输入至逆变桥输出的传递函数为

$$K_{PWM} = \frac{U_{r-U}(s)}{U_{ref}(s)} = \frac{U_{dc}}{2U_{tri}} \quad (12)$$

从式(12)可以看出，在SPWM中，当载波频率远高于输出频率时，逆变桥部分可以看成是一个比例环节，比例系数即为 K_{PWM} 。

3 常规 PI 控制

图4所示的是三相静止坐标系下的常规PI电流控制原理图。

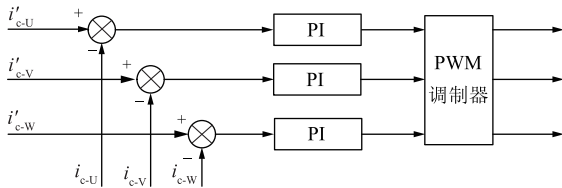


图4 三相静止坐标系下的常规PI控制

Fig.4 General PI Control in Three-phase Stator Coordinate

三相坐标系下的逆变器可看作一个比例环节，在采用PI控制的情况下，可以将这个比例环节等效在PI校正环节中的比例环节中当成一个PI环节看待，得到单相电流控制传递函数框图如图5所示。图中 u_s 为所研究相的系统侧电压，可以看作一个干扰信号。可以想象，由于存在一个幅值很大的正弦干扰信号，因此将会对控制性能产生很大的影响。

采用EMTDC/PSCAD进行仿真，仿真电路原理图如图1所示，非线性负载为具有三相二极管整流桥的阻感负载。仿真电路主要参数见表1。

为了与各种PI控制方法进行比较，将PI控制的参数取为 $K_p = 45$ ， $K_i = 0$ ，即只进行P调节。以下仿真都以U相为例，结果如图6所示。由这些图可以看出，补偿效果不是很好，在有些部分出现比

较大的误差，桥臂电流不能很好地跟踪指令电流。

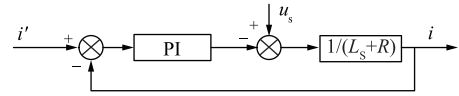


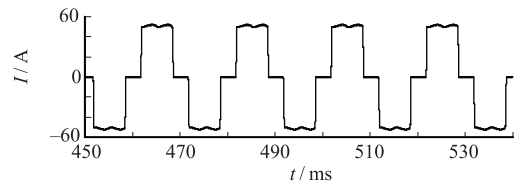
图5 三相坐标系下常规控制电流环传递函数框图

Fig.5 Transfer Function Diagram of General Control Current Loop Three-phase Stator Coordinate

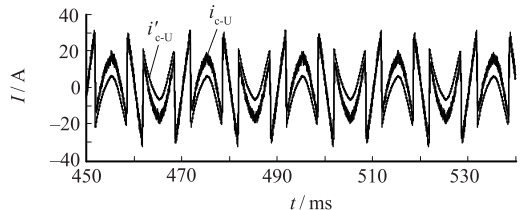
表1 仿真电路主要参数

Tab.1 Main Parameters of the Simulation System

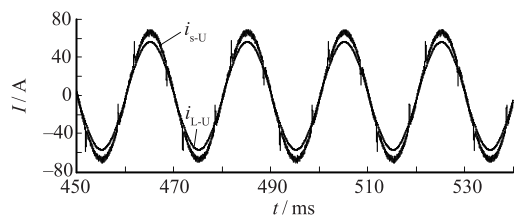
| 量符号 | 仿真参数 | 说明 |
|------------|---------------|----------------|
| U_s | 220 V | 三相交流电源相电压有效值 |
| f | 50 Hz | 电网频率 |
| L | 2 mH | APF 输出电感 |
| R | 0.1 Ω | APF 输出交流电抗等效电阻 |
| C | 4 700 μ F | APF 直流侧电容 |
| U_{dc} | 1 000 V | APF 直流侧电压 |
| f_s | 12.8 kHz | 控制系统采样/开关频率 |
| L_{load} | 15 mH | 非线性负载滤波电感 |
| R_{load} | 10 Ω | 非线性负载电阻 |



(a) 负载电流
(a) Load Current



(b) 谐波指令电流 i'_{c-U} 和桥臂实际电流 i_{c-U}
(b) Harmonic Instruction Current i'_{c-U} and Bridge Current i_{c-U}



(c) 负载基波电流 i_{L-U} 和补偿后电源侧电流 i_{s-U}
(c) Load Fundamental Current i_{L-U} and Source Current i_{s-U} after Compensation

图6 常规PI控制下的仿真结果

Fig.6 Simulation Results of General Control

4 补偿 PI 控制

图 5 所示控制器的效果不是很好一个重要原因是在控制框图中存在 u_s 干扰, 为了达到更好的控制效果, 可以采用补偿的思想消除 u_s 干扰, 具体实现如图 7 所示。

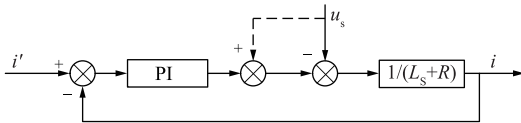
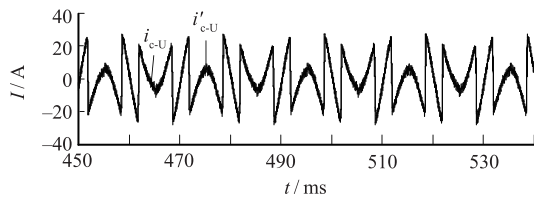


图 7 三相坐标系下补偿控制电流环传递函数框图

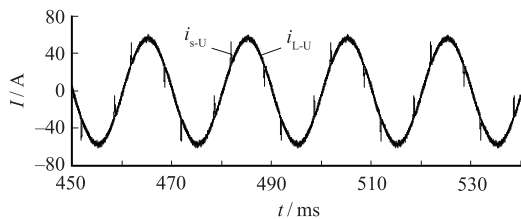
Fig.7 Transfer Function Diagram of Compensatory Control Current Loop Three-phase Stator Coordinate

仿真结果如图 8 所示, 此时系统的负载与图 6 一样, PI 参数仍然为 $K_p = 45, K_i = 0$ 。从图可以明显看出, 采用补偿后, 得到的结果比三相常规 PI 控制好很多, 输出基本能完全跟踪指令电流。



(a) 谐波指令电流 i'_{c-U} 和桥臂实际电流 i_{c-U}

(a) Harmonic Instruction Current i'_{c-U} and Bridge Current i_{c-U}



(b) 负载基波电流 i_{L-U} 和补偿后电源侧电流 i_{s-U}

(b) Load Fundamental Current i_{L-U} and Source Current i_{s-U} after Compensation

图 8 补偿 PI 控制下的仿真结果

Fig.8 Simulation Results of Compensatory Control

同时由图 8 可以看出, 采用补偿的方法仅仅是消除了 u_s 干扰, 其电流控制环节的闭环传递函数及其特征根并没有发生任何变化, 因此和传统 PI 控制在相同的 PI 参数下是具有可比性的。

5 结论

1) 当载波频率远高于输出频率时, 逆变桥部

分可以看成是一个比例环节, 比例系数即为 K_{PWM} 。

2) 传统常规 PI 控制下 APF 的电流闭环传递函数中存在一个周期性的干扰信号, 这对系统的跟踪控制性能有很大的影响。

3) 采用补偿的 PI 控制后, 结果比三相常规 PI 控制好很多, 输出基本能完全跟踪指令电流。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴亮昌, 孙树勤, 宋文南, 等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水力电力出版社, 1998.
- [3] 刘平. 用于超导储能系统的高性能电压源变换器控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- [4] 何英杰. 二极管钳位型三电平 APF 控制与谐波检测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [5] 张长征. 高压大容量交流有源电力滤波器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [6] PENG F Z. Application Issues and Characteristics of Active Power Filters[J]. IEEE Ind Appl Mag, 1998, 4 (4): 21-30.
- [7] GYUGYI L, STRYCUA E C. Active AC Power Filters [C]// IEEE/IAS Annual Meeting, 1976: 529-535.
- [8] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits [J]. IEEE & JIEE IPEC, 1983: 1375-1386.
- [9] 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 Weizheng, LIU Jinjun, et al. Harmonic Source and Compensation Characteristics of Active Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (2): 16-20.
- [10] 杨荫福, 段善旭, 朝泽云. 电力电子装置及系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [11] 熊健. 三相电压型高频 PWM 整流器研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 1999.
- [12] 高大威, 孙孝瑞. 有源电力滤波器的延时特性对补偿效果影响的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13 (4): 28-31.
- GAO Dawei, SUN Xiaorui. A Study about Influence of Time delay on Compensation Results for Active Power Filters[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13 (4): 28-31.
- [13] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [14] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

收稿日期: 2009-05-13

作者简介:

杨用春 (1982), 男, 重庆人, 助教, 工学硕士, 主要研究高压直流输电与 FACTS 技术 (e-mail) yongchunyang@126.com;

赵成勇 (1964), 男, 浙江丽水人, 教授, 博士生导师, 主要研究高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制、电力系统 RTDS 建模等;

李广凯 (1975), 男, 山东聊城人, 副教授, 工学博士, 主要研究高压直流输电与 FACTS 技术。