

新型有源电力滤波器补偿特性研究

吴 非¹, 解 大¹, 张延迟²

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200030;

2. 上海电机学院 电气工程系, 上海 200240)

摘要: 有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)是解决电网谐波问题的有效手段,其补偿性能取决于谐波电流检测方法和电流控制方法。介绍了一种基于功率平衡原理的新型 APF,分析了低速的周期离散技术的电压环和高速的电流环控制策略,得到了具有 2 个反馈环的系统数学模型。研究了电流检测部分的比例、积分环节对补偿特性的影响,比例系数增大可提高 APF 的补偿特性,而积分系数过大可能导致系统振荡。动态模拟实验验证了理论分析的结论。

关键词: 有源电力滤波器; 数学模型; 谐波; 补偿特性

中图分类号: TN 713⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)01-0036-03

有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)的补偿性能决定于其谐波及无功电流检测方法以及补偿电流控制方法^[1-12]。本文针对一种新型 APF,介绍了其基本结构,着重分析了无功和谐波电流检测环节的工作原理。利用分析得出的控制系统数学模型,深入研究电流检测环节中比例、积分环节对系统补偿特性的影响。最后,通过实验验证了理论分析。

1 拓扑结构及工作原理

1.1 拓扑结构

APF 电路结构如图 1 所示。

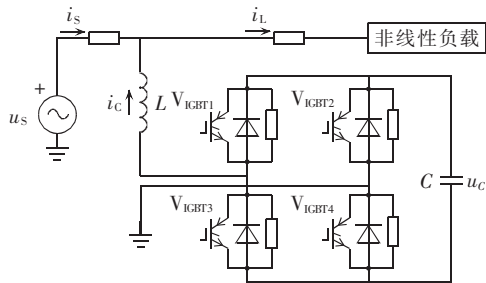


图 1 APF 的电路结构

Fig.1 Main circuit of APF

图中, i_s 为电源电流, i_L 为负载电流, i_c 为补偿电流, u_c 为逆变器直流侧电容电压, u_s 为电源电压。当 APF 直接以电网中电流 i_s 为参考电流时,逆变器交流侧电感 L 上输出的补偿电流 i_c 包含基波有功电流、基波无功电流和谐波电流。设电网电压为无畸变正弦波,则基波有功电流与基波电压产生有功功率,其他电流与基波电压产生无功功率。有功功率将要消耗逆变器直流侧电容 C 上储存的能量,使得电容电压 u_c 不断下降。根据功率平衡原理,当 u_c 保持不变时,逆变器交流侧输出的补偿电流 i_c 只包

含无功电流和谐波电流而不包含基波有功电流。根据以上分析,通过控制使逆变器直流侧电容电压 u_c 维持稳定,则 APF 发出的补偿电流 i_c 不包含基波有功含量。利用电容电压的变化增量和检测到的电网电压即可得到系统基波有功电流,从而得到需要补偿的谐波电流和无功电流,进而通过控制逆变器的输出补偿了电网中的无功和谐波电流。

1.2 控制系统工作原理

APF 系统控制结构如图 2 所示,分为电流控制内环和电压控制外环,采用采样控制。图中, u_s 、 u_c 、 i_s 、 i_c 与前一节的描述相同, u_B 为电容电压参考值,其大小根据电容 C 的电压初始设定值确定。 u_c 与 u_B 经过比较后输入采样环节,采样频率为 50 Hz。电压环为低速环,采用周期离散控制,以维持直流侧电容电压稳定为目标,同时根据检测到的电容电压的变化增量得到电网基波有功电流 i_p 。 i_s 可以被认为逆变器输出补偿电流 i_c 的反馈。电流环为高速环,采用平均电流补偿控制策略,能够快速地跟踪参考电流指令信号,同时产生补偿电流 i_c ,使电网电流波形趋于标准正弦波。

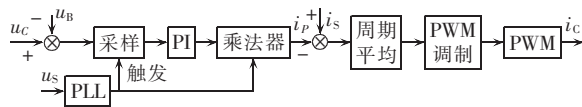


图 2 APF 控制策略

Fig.2 Control strategy of APF

2 控制系统数学模型

控制系统传递函数模型如图 3 所示。图中, i_s 为补偿后的电网电流, i_c 为逆变器输出的补偿电流, i_L 为负载电流。

$G_p(z)$ 代表补偿电流发生器环节,其频率特性与一个时间常数很小的一阶惯性环节类似,因此用一个一阶惯性环节近似表示补偿电流发生器。其传递

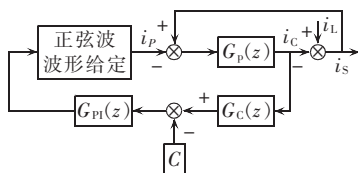


图 3 传递函数模型

Fig.3 Model of transfer function

函数为

$$G_p(z) = (k_p / \tau_p) z / z - e^{-T_s / \tau_p} \quad (1)$$

式中比例系数 $k_p = 1$; 惯性环节时间常数 $\tau_p = 0.07 \text{ ms}$; 采样周期 $T_s = 0.05 \text{ ms}$ 。

$G_c(z)$ 是逆变器直流侧电压检测环节,其输出的是 PWM 直流侧电容电压波形。电容上的电压波形可以由其自身的电流波形所得出,如下式所示:

$$u_c = \frac{1}{C} i_c dt \quad (2)$$

在实际电路中,电容上的电流与补偿电流之间在每个电源周期内的积分结果是相同的,因此可以用补偿电流的积分代替电容上电流的积分来表示电容电压。其传递函数为

$$G_C(z) = (T_c / C) / (z - 1) \quad (3)$$

式中 电容值 $C = 66.67 \text{ mF}$; 采样周期 $T_c = 0.05 \text{ ms}$ 。

$G_{PI}(z)$ 代表比例积分 PI(Proportional Integral)环节,该环节根据采样所得的电压比较值,进行计算后得到电网基波电流的幅值。将幅值输入正弦波波形

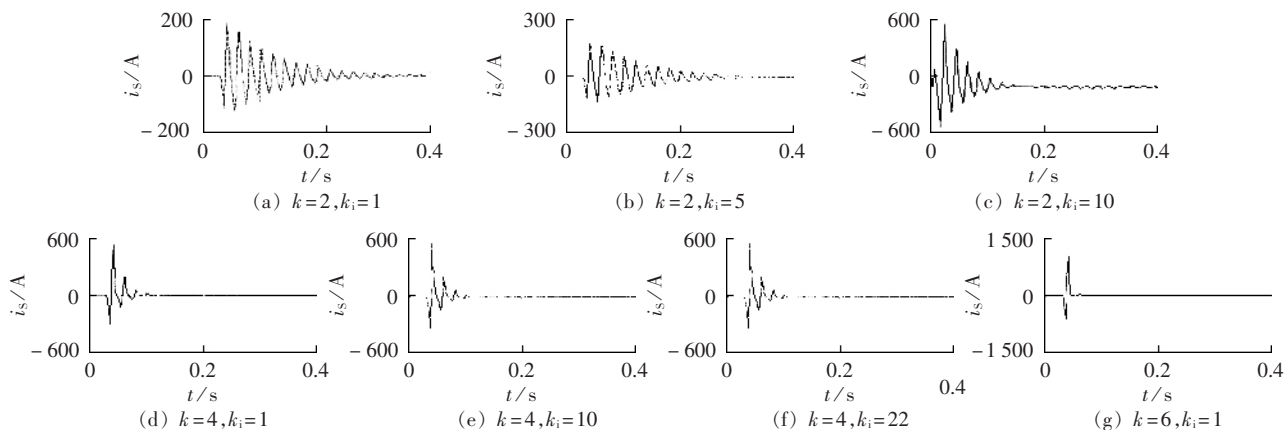


图 4 取不同值时系统的阶跃响应

Fig.4 Step responses of control system to different k and k_i

对比图 4(a)(b)、(d)(e)可以看出,当 k 不变时,随着 k_i 的增大系统的响应速度不变。通过图(a)(b)和(c)可以看出,当 k_i 过大时会导致系统出现振荡。同样,对比图 4(a)(d)和(g)可以看出,随着 k 的增大,系统的响应速度随之加快,响应的振幅也随之增大。对比图 4(c)(e)和(f)可以看出, k 的增大可以抑制 k_i 增大造成的系统振荡,但 k 值不可无限增大,从图 4(g)可以看出,当 k 取值过大时系统阶跃响应幅值明显过大。

4 仿真和实验结果

通过前面的分析,利用 EMTF 构建了新型 APF

给定环节,得到电网中的基波电流。其传递函数为

$$G_{\text{PI}}(z) = k + \frac{k_i z}{z-1} \quad (4)$$

式中 k_i 为积分环节系数, k 为 PI 环节比例系数。

正弦波波形给定环节是根据输入的电网基波电流幅值和电网电压相位得到电网基波电流参考向量。

由前一节可知,逆变器直流侧电容上电压的变化可以反映电网基波电流的大小。通过比例环节将采样得到的电压比较值修正后可以得到电网基波电流的幅值。积分环节用来调节静差,使得电容上电压在给定参考电压值附近波动,改善系统的稳态性能。PI 环节参数的选取对系统补偿特性具有重要作用,下面将对 PI 环节参数的选取对滤波器的补偿特性影响进行分析。

3 补偿特性分析

准确快速地检测出电网中的无功和谐波电流对 APF 的补偿性能至关重要。由图 2 中可以看出,在新型 APF 的电流检测环节中,PI 环节直接决定了逆变器直流侧电容电压的变化能否正确反映电网基波电流的幅值大小,对于系统的补偿性能起着关键作用。同时,对于电网中的突变负荷,要求滤波器能快速跟踪变化的负荷电流;因此,PI 环节参数的选取对系统的快速跟踪性能有着重要作用。系统的阶跃响应曲线如图 4 所示。

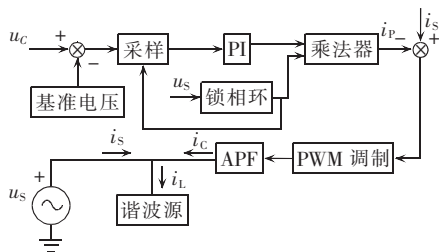


图 5 控制系统的仿真图

Fig.5 The control system for simulation

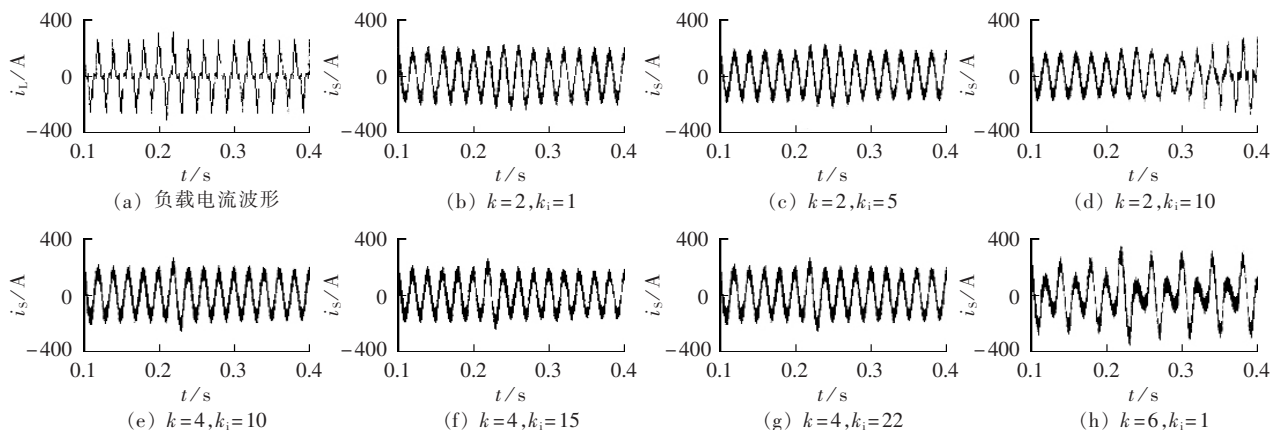


图 6 仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms

电流。从图 6 中可以看出,当 k 取 2 时,APF 通过 3 个电源周期恢复到稳定状态,当 k 取 4 时,仅过 1 个周期便达到稳态;对比图 6(b)(c)和(d)可以发现, k_i 变化时系统对负荷的补偿性能变化不大;对比(d)和(g)可以看出 k_i 过大时系统发生了不稳定,同时提高 k 的取值可以使 k_i 导致系统振荡的取值提高;从图 6(h)可以看出, k 过大时系统也会发生不稳定。

5 结论

通过以上分析,可以就本文所研究的新型有源电力滤波器得到结论如下:

a. 新型有源电力滤波器的补偿关键在于电网基波电流的准确计算,电流检测环节中的 PI 环节起着关键的作用,对滤波器的补偿性能影响很大;

b. PI 环节中比例系数 k 的增大会提高滤波器对波动负荷的补偿性能;积分系数 k_i 的增大对补偿性能影响不大,但 k_i 取值过大会使滤波器控制系统发生振荡,同时增大 k 的取值可以抑制 k_i 增大造成的振荡;但是 k 取值过大也会使系统不稳定。

参考文献:

- [1] 郝江涛,刘念,幸晋渝,等. 电力系统间谐波分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):36-39.
HAO Jiang-tao,LIU Nian,XING Jin-yu,et al. Study on inter-harmonic of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(12):36-39.
- [2] 钱照明,叶忠明,董伯藩. 谐波抑制技术[J]. 电力系统自动化,1997,21(10):48-54.
QIAN Zhao-ming,YE Zhong-ming,DONG Bo-fan. Harmonics suppression techniques[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(10):48-54.
- [3] 胡铭,陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(2):66-70.
HU Ming,CHEN Heng. Active power filter technology and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(2):66-70.
- [4] 栗时平,李圣怡. 并联有源滤波器的最优电压滞环电流控制[J]. 电力自动化设备,2002,22(4):14-17.
SU Shi-ping,LI Sheng-yi. The optimal voltage hysteresis current control of shunt active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(4):14-17.
- [5] MALESANI L,MATTAPELLI P,TOMASIN P. High-performance hysteresis modulation technique for active filter[J]. IEEE Trans

on Power Electronics,1997,12(5):876-884.

- [6] 邹荣盛,刘会金,陈允平,等. 一种新型有源滤波器控制方法——单周控制[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):75-77.
ZOU Rong-sheng,LIU Hui-jin,CHEN Yun-ping,et al. One cycle control—a new control method of APF[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):75-77.
- [7] 马惠,刘静芳,刘斌帅. 改进的有源电力滤波器三角波脉宽调制电流控制方法[J]. 电力自动化设备,2004,24(11):30-33.
MA Hui,LIU Jing-fang,LIU Bin-shuai. Improved triangle-wave pulse-width modulation current control method for active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(11):30-33.
- [8] 叶忠明,董伯藩,钱照明. 谐波电流的提取方法比较[J]. 电力系统自动化,1997,21(12):21-24.
YE Zhong-ming,DONG Bo-fan,QIAN Zhao-ming. Comparison of tow approaches for harmonic current extraction[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(12):21-24.
- [9] 舒双焰,丁洪发,段献忠. 基于自适应数字滤波的谐波检测[J]. 电力自动化设备,2000,20(6):13-16.
SHU Shuang-yan,DING Hong-fa,DUAN Xian-zhong. Harmonic detection based on adaptive digital filtering[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(6):13-16.
- [10] 林添顺,黄阜民,张尧. 单相自适应检测在三相无功及谐波电流检测中应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):66-69.
LIN Tian-shun,HUANG Fu-min,ZHANG Yao. Three phase harmonic and reactive currents detecting based on single-phase adaptive detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(3):66-69.
- [11] 刘开培,张俊敏,陈艳慧. 基于重采样的三相谐波检测瞬时无功功率法[J]. 电力系统自动化,2003,27(12):45-47.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min,CHEN Yan-hui. Instantaneous harmonics detecting method for three-phase circuits based on resampling[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(12):45-47.
- [12] 刘开培,张俊敏. 基于 DFT 的瞬时谐波检测方法[J]. 电力自动化设备,2003,23(3):8-10.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min. Instantaneous harmonic detection based on DFT[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(3):8-10.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

吴非(1980—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真;

解大(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真(E-mail:xieda@sjsu.edu.cn);

张延迟(1967—),男,北京人,副教授,从事并网型风力发电机和电力系统仿真方面的研究。

Research on compensative characteristics of active power filter

WU Fei¹, XIE Da¹, ZHANG Yan - chi²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: APF(Active Power Filter) is an effective means to eliminate current harmonics. Its compensative performance depends on harmonic current detection and control methods. A novel active power filter based on power balance is introduced, of which the low speed voltage - loop control strategy based on period disperse technique and the high speed current - loop control strategy are analyzed to establish the system mathematical model with two feedback loops. The influence of PI regulation in current detection part on compensative characteristics is studied. Increase of the proportional coefficient may improve compensative characteristics, while excessive increase of the integral coefficient may induce oscillation. Dynamic experiments prove results of theoretical analysis.

Key words: active power filter; mathematical model; harmonics; compensative characteristics