

一种电力有源滤波器滞环电流控制方法

为了提高补偿电流跟踪检测电流的效率，在传统的普通滞环电流控制方法的基础上，对自适应可变环宽滞环电流控制以及内嵌双滞环电流控制方法进行了研究，并将两种方法结合使其成为一种新的控制策略。此方法简单可行，不需要计算大量的数据，不但能有效地跟踪指令电流信号，而且能有效地降低开关频率，改良电流跟踪性能。仿真结果证明了方法的正确性。

李秉辉 李 岚/太原理工大学电气与动力工程学院



李秉辉/硕士研究生

随着电力电子变流技术的发展，大量非线性负荷接入电网运行，随之而来的电能质量问题不得不引起人们的关注。众所周知，电力有源滤波器（APF）是目前解决谐波对电网以及用户造成威胁问题的最佳方法。

APF的两大核心部分分别是指令电流计算和谐波电流跟踪补偿。谐波电流跟踪控制方法一般采用PWM信号驱动IPM模块工作的方式，传统的PWM跟踪控制方法有两种：载波三角波电流控制方法和滞环电流控制方法^[1-3]。两种方法各有利弊。

前者开关频率恒定、噪声小，装置稳定性相对好，但缺点是反应速度比较慢，准确度不高^[4]；后者准确度较高，动态响应快，缺点是开关频率不固定，波动较大^[5]。

本文从滞环电流控制的模型入手，分别对基于自适应可变环宽的滞环电流控制方法和内嵌双滞环电流方法进行了研究。前者动态性能良好，可以有效地

降低开关频率，并使其保持在一个相对稳定的数值上，其控制方法的中心思想简单地说是牺牲固定的环宽，来换取相对稳定的开关频率，文献[6]中对其进行了说明，该方法也可以和其他模型相结合，文献[7]中结合了神经网络控制模型。后者在传统滞环控制方法的基础上，巧妙分析不同时刻的开关状态，在原有滞环内内嵌了一个滞环，使得开关状态更加合理有效，大大降低了开关损耗^[8]。其实两种方法的目的都是在满足THD含量的前提条件下，尽可能地减小开关频率，减小开关损耗，使得滞环方法的不足得到改善。最终将以上两种方法进行了有效的结合，结合后的新方法比之前的两种方法更加有效、实用，仿真结果也充分证明了这点。

电流滞环控制原理

1. 并联APF原理

典型的并联APF原理图如图1所示。

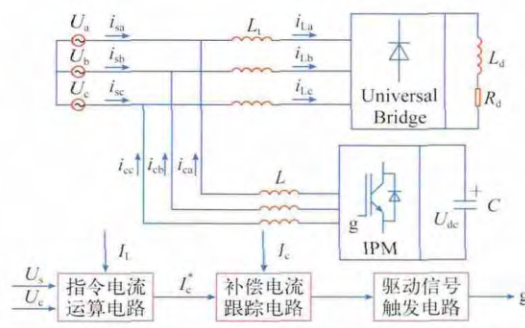


图1 并联APF原理图

图1中，通过检测负荷电流 i_L 计算出其谐波分量 i_h ，这里的谐波电流 i_h 可以是谐波有功和无功之和，也可以是单纯的谐波有功。得到指令电流 i_c^* （理想情况下 i_c^* 就

关键词/Keywords

滞环电流控制·

自适应·

有源滤波·

电流跟踪·

山西省科技攻关项目（20110321061）。

是 i_h)后通过电流跟踪控制电路的计算得出可以驱动电力电子器件的PWM信号,从而使APF输出电流 i_c 跟踪 i_c^* ,随后将 i_c 补偿给电网,与谐波 i_h 相互抵消,达到补偿目的。很明显,APF的性能很大程度上依赖于电流跟踪控制环节的计算补偿效果。

2. 滞环电流控制原理

APF的滞环电流控制是利用指令电流,通过在指令电流上下分别设置一个环宽,控制补偿电流在上下环宽之间流动,使得补偿电流和指令电流的误差在 $\pm HB$ 之内。由于环宽是一个比较小的数值,所以补偿电流可以很好地跟踪指令电流。原理图如图2所示。

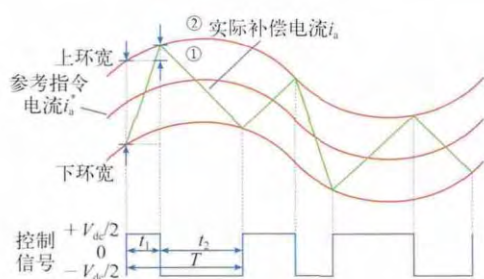


图2 传统滞环电流控制方法原理图

本文仅以a相为例说明控制原理,当电流 $i_a - i_a^* \geq +HB$ 时,此时补偿电流已经达到或者超过上限边界,这时给a相对应的上桥臂低电平的控制信号,由于同桥臂开关元件不能同时导通,此时a相对应的下桥臂得到的是与上桥臂相反的控制信号,即高电平的开通信号(这里暂且忽略死区时间)。接收到控制信号并完成开关元件动作后,a相电流 i_a 随之减小并向指令电流方向逼近。当补偿电流 i_a 一直减小,穿过指令电流 i_a^* 并到达下边界时,即 $i_a - i_a^* \leq -HB$ 时,控制开关元件动作的信号与之前描述的刚好相反,即上桥臂开通、下桥臂关断,随后的过程一直重复上述的两种状态。

上述方法存在一些不足,其开关频率变化剧烈,交流侧伴随着大量谐波,调制信号脉冲不规律,以上种种不足对其提出了改进需求。

新型滞环电流控制方法

1. 滞环电流控制模型

首先分析一下滞环电流控制的数学模型,找

到开关频率和滞环宽度的关系。根据串联电感两端电压和流过电流的关系,有下式

$$\frac{di_a^+}{dt} = \frac{0.5U_{dc} - U_s}{L} \quad (1)$$

$$\frac{di_a^-}{dt} = \frac{-0.5U_{dc} - U_s}{L} \quad (2)$$

式中, i_a^+ 和 i_a^- 分别为上升电流和下降电流; L 为逆变器串联电感; U_{dc} 为直流侧电容电压; U_s 为电网参考电压。

通过图2几何结构之间的关系,可得下式

$$\frac{di_a^+}{dt}t_1 - \frac{di_a^{\text{ref}}}{dt}t_1 = 2HB \quad (3)$$

$$\frac{di_a^-}{dt}t_2 - \frac{di_a^{\text{ref}}}{dt}t_2 = -2HB \quad (4)$$

并且可以清楚的知道

$$t_1 + t_2 = \frac{1}{f} \quad (5)$$

式中, t_1 和 t_2 分别为a相上下桥臂的开通时间; f 为开关频率。整理式(1)~式(5)就可以得出下式

$$HB = \frac{0.25U_{dc}^2 - \left(U_s + L \frac{di_a^{\text{ref}}}{dt} \right)^2}{2fLU_{dc}} \quad (6)$$

由式(6)可以知道环宽与调制频率的关系,可以通过检测不同时刻的系统参数来实时计算出此时的环宽,得到变化的环宽后再根据上节介绍的滞环特性,使其补偿电流跟踪指令电流,从而达到自动调整系统状态的目的,使系统具有自适应的能力。

2. 内嵌双滞环控制原理

所谓内嵌双滞环就是在传统滞环内再加入一个滞环,这样就有两个滞环可以约束电流的大小,此方法可以更加有效地控制开关频率,使其工作更加合理化,打破传统控制同一桥臂交替导通的理念。工作原理图如图3所示。

将原有的环内和环外两个区域细分为现在的三个区域,图3中可以看到①和②区域等于把传统方法的环内区域①细分了一下。当采样点采集的数据大小在图3中①区域时开关管不动作,保持原有开关状态。当采样点采集的数据大小在②区域

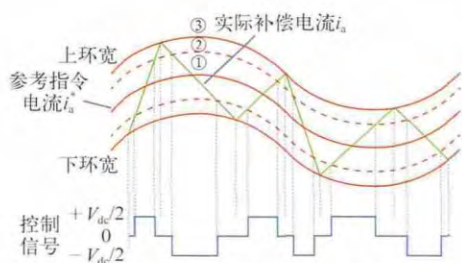


图3 内嵌双滞环电流控制原理图

时让两个开关管同时关闭，此时就有对应的两种状态：一种是电流大于零，两个开关管都关断，使电流自动下降直到穿过指令电流到达下边界，从而执行下一个工作状态；另一种是电流小于零，虽然此时两个开关管同时关闭，补偿电流不会朝指令电流方向流动，但当它到达外边界时，开关一样会动作使其电流始终在两个环宽内流动。当采样点采集数据在③区域时，控制上桥臂关断、下桥臂开通。在这样的控制之下，开关状态就由原来的两种增加为现在的三种，更加合理有效。由于上下两个环宽是对称的，所以当电流小于指令电流时控制原理相同。

本文将自适应电流滞环控制和内嵌双滞环电流控制两种方法有效地结合起来，不但让开关频率减小，而且可以让开关周期更加均衡，有益于减小开关损耗、噪声等负面问题。

仿真结果与分析

为了检验本文所提出方法的可行性和正确性，在Matlab环境下对该方法进行了仿真验证，并且与相同条件下普通滞环电流控制方法结果进行了对比分析。仿真参数如下：电源线电压为 $U_s = 380\text{ V}$ ，系统阻抗忽略不计；负荷为三相全控整流桥，负荷电感 $L_d = 1\text{ mH}$ ，负荷电阻 $R_d = 8\text{ }\Omega$ ；串联电感 $L_l = 2\text{ mH}$ ；直流侧电容为 $C = 0.0015\text{ F}$ 。

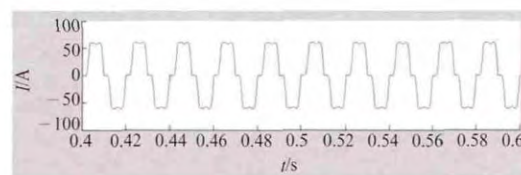
其中PWM输出部分的S函数的部分程序能够很清楚地说明此控制方法的思想。

```
if u>HB
    switch=0
elseif u(1)<-HB
    switch=2
```

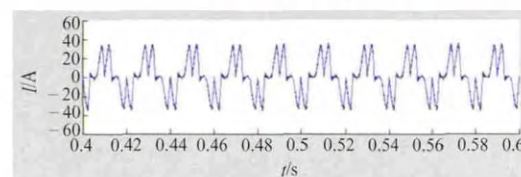
```
elseif [u(1)> 2HB/3]&[u(1)< HB ]
    switch=1
elseif [u(1)< -2HB/3]&[u(1)>-HB]
    switch=1
else
    hold
end
```

switch = 0、1和2分别对应a相所得电压是 $-U_{dc}/2$ 、0和 $+U_{dc}/2$ 。

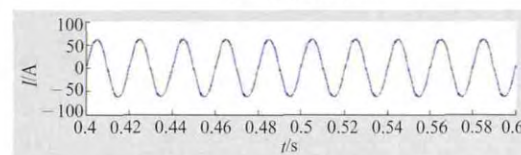
图4为自适应加双滞环控制方法仿真结果。



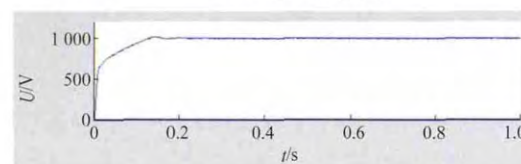
(a) 负载电流波形



(b) 指令电流波形



(c) 电源电流波形



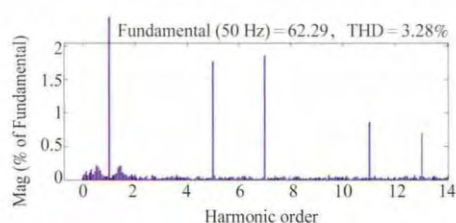
(d) 电容电压波形

图4 自适应加双滞环控制方法仿真结果

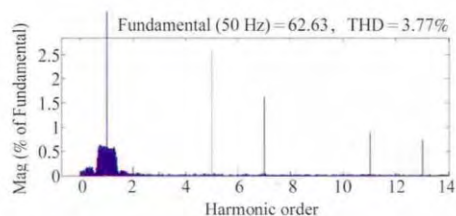
图5为两种控制方法谐波分析结果。可以看出传统方法的THD从20.04%下降到3.28%，新方法则降到了3.77%，均满足实际要求。

图6为两种方法PWM脉冲信号，可以看到传统方法在忽略死区时间的情况下，同桥臂的开关管对应开关时间互补，仅有两种开关状态；新方法的同桥臂开关管则有如之前描述的三种状态。

对两种方法的开关频率进行测试，同一时间

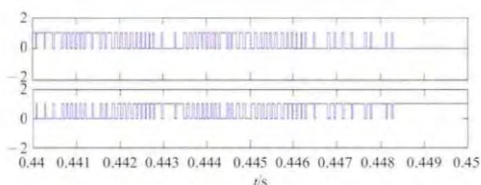


(a) 传统方法

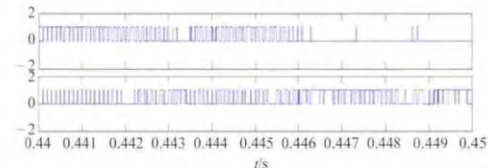


(b) 自适应加双滞环控制方法

图5 两种控制方法谐波分析结果



(a) 传统方法



(b) 自适应加双滞环控制方法

图6 两种方法PWM脉冲信号

段里传统方法的开关次数比新方法的,并且通过对这两组数据的平均值计算得到传统方法的开关频率平均值大约在8.9 kHz,而新方法的开关频率平均值在6.8 kHz。

结束语

本文设计了一种新型滞环电流控制方法,与传统的滞环电流控制方法进行了对比,新方法利用系统参数实时计算出每个时刻最佳的环宽,并结合内嵌双滞环方法,使得开关控制信号更加细致和准确。两种方法总体来说都能满足系统的要求,但新方法在传统方法控制谐波含量的基础上,不但使开关频率脉动变小,同时也有效地降

低了开关频率,减小了开关损耗、开关噪声等一系列不足,从而延长了APF的寿命。仿真实验结果证明了该方法的可行性和正确性。

参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].2版.北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 王兆安,刘进军,等.电力电子技术[M].5版.北京:机械工业出版社,2009.
- [3] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [4] 邢雪菲.基于DSP的有源滤波装置谐波检测及其控制策略的研究[D].太原:太原理工大学,2011.
- [5] 刘桂英,栗时平.并联有源电力滤波器滞环电流比较控制研究[J].高电压技术,2005(5):58-60.
- [6] Vahedi H, Kukandeh Y R, Dankoob A. Comparison of adaptive and fixed-band hysteresis current control considering high frequency harmonics [C]. Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), 2011: 185-188.
- [7] Masjedi S, Ahmadi M, Pashajavid E. Improved shunt APF based on using adaptive RBF neural network and modified hysteresis current control [C]. Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010: 216-220.
- [8] Saswat Kumar Ram, Banee Bandana Das. Comparison of different control strategy of conventional and digital controller for active power line conditioner (APLC) for harmonic compensation [C]. Environment and Electrical Engineering (EEEEIC), 2013: 209-214.
- [9] 王中鲜. MATLAB建模与仿真应用[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [10] 赵广元. MATLAB控制系统仿真实践[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009.

(收稿日期:2014-03-17) EA