并联型APF控制技术及其应用

有源电力滤波器（Active Power Filter，APF）的控制核心主要包括补偿电流控制和直流侧电容电压控制两个部分，在对空间电压矢量脉宽调制（SVPWM）控制方法和直流侧电压控制的基本原理分析的基础上进行仿真，仿真结果表明基于SVPWM电流控制和基于传统PI调节的APF补偿效果较理想，为进一步稳定直流侧电压，提高补偿效果，在电压闭环控制的基础上，引入模糊自适应比例积分（PI）调节器，明显减小了直流侧电压的波动，超调量和静差有了很大的改善，具有良好的控制效果。实验结果也验证了该设计方法的可行性。

宋　辉　席自强／湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心

宋　辉／教授

关键词／Keywords
有源电力滤波器·
空间电压矢量脉宽调制·
比例积分调节·
模糊自适应·

有源电力滤波器（Active Power Filter，APF）在检测到指令电流信号后，一方面通过合适的PWM调制方法，作用于APF变流器上，使之产生相应的补偿电流；另一方面要使直流侧电容电压维持在一个基本固定的值，才能保证APF正常工作[1]。其中常见的补偿电流控制方法有三角载波控制法、滞环比较控制法、空间矢量控制法和神经网络控制法等[2]。而直流侧电容电压控制一般采用两种方法：①直接用开关电源作为能量来源；②通过对直流侧电容电压进行PI调节，即在检测出的谐波电流中叠加一定的基波有功电流，再通过闭环控制使得直流侧电容电压保持在给定值附近。

本文主要对基于SVPWM电流控制方法和直流侧电压控制的基本原理进行研究[3]，通过仿真工具Matlab/Simulink建立APF控制系统仿真模型并进行分析；在此基础上提出直流侧电压控制改进策略并进行仿真验证，最后搭建APF实验系统平台，验证了所设计的补偿电流控制和直流侧电容电压控制方法的有效性。

并联型APF控制方法

并联型APF主电路拓扑结构如图1所示。

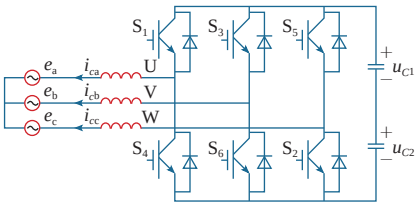


图1　并联型APF拓扑结构

1. 电压空间矢量电流控制

APF基于SVPWM的补偿电流控制方法实现过程如下[4]。

（1）电流控制数学模型

APF控制方法数学模型可以描述为

$$\begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Lp+R & -\omega L \\ \omega L & Lp+R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中，v_d、v_q为变流器交流侧电压dq轴分量；p为微分算子。由式（1）可知，控制APF输出电流i_d、i_q的大小关键在于改变变流器交流侧电压v_d、v_q的大小。v_d、v_q的方程可以描述为

$$v_d = -(L\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} + Ri_d) + \omega L i_q + e_d \quad (2)$$

$$v_q = -(L\frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + Ri_q) - \omega L i_d + e_q \quad (3)$$

将式（2）和式（3）括号中的项用PI调节器代替，v_d、v_q可以表示为

$$v_d = -(K_{IP} + \frac{K_{iI}}{s})(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \quad (4)$$

$$v_q = -(K_{IP} + \frac{K_{iI}}{s})(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q \quad (5)$$

式（4）与式（5）体现的是APF电

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

流控制结构，该控制结构实现了dq轴的解耦，并引入了e_d、e_q的前馈控制，其控制结构如图2所示。

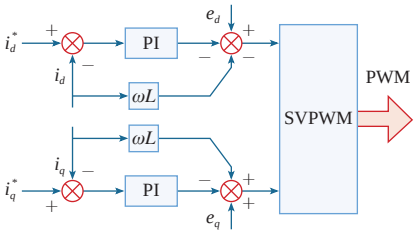


图2　有源电力滤波器电流控制结构

（2）电压矢量与开关状态的关系

空间矢量脉宽调制技术的核心在于如何充分优化APF交流侧电压矢量与开关状态之间的关系[5-6]。APF主电路开关器件上的开关状态一共有$2^3=8$种，8种工作状态对应8个空间矢量，其中$\boldsymbol{V}_0$(0 0 0)和$\boldsymbol{V}_7$(1 1 1)模都为零，可以统称为零矢量。该8个空间矢量在复平面上的分布如图3所示，并同时满足

$$\begin{cases}\boldsymbol{V}_k=\dfrac{2}{3}v_{\mathrm{dc}}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(k-1)\pi/3}\\ \boldsymbol{V}_{0,7}=0\end{cases}\tag{6}$$

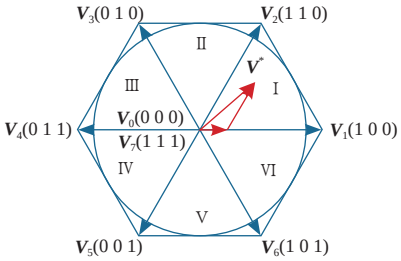


图3　电压空间矢量复平面分布图

根据矢量复平面分布情况和平行四边形法则，以扇区I为例，其合成公式为

$$\frac{T_1}{T_s}\boldsymbol{V}_1+\frac{T_2}{T_s}\boldsymbol{V}_2=\boldsymbol{V}^*\tag{7}$$

式中，T_1、T_2分别为合成矢量$\boldsymbol{V}_1$、$\boldsymbol{V}_2$在一个开关周期内的等效持续时间；T_s为PWM开关周期。令零矢量在开关周期中的等效持续时间为T_0，则其满足

$$T_1+T_2+T_0=T_s\tag{8}$$

由$\boldsymbol{V}^*$矢量空间的分布关系可得合成矢量持续时间分别为

$$\begin{cases}T_1=mT_s\sin(\pi/3-\theta)\\ T_2=mT_s\sin\theta\\ T_0=T_s-T_1-T_2\end{cases}\tag{9}$$

式中，m为SVPWM波调制系数，满足

$$m=\frac{\sqrt{3}}{v_{\mathrm{dc}}}\left|\boldsymbol{V}^*\right|\tag{10}$$

图4为空间矢量补偿控制的效果，在0.03 s时APF投入运行，系统交流侧的谐波电流含量由之前的21.6%下降为4.57%，补偿效果十分明显。

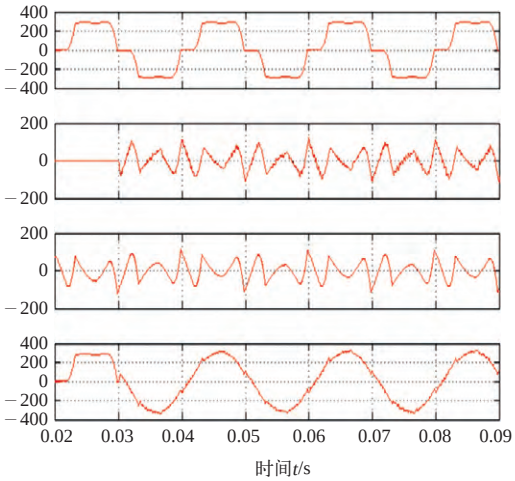


图4　空间矢量补偿控制效果

2. APF直流侧电压控制

APF直流侧电压的控制是保证其稳定、高效运行的重要环节，而其在工作时的损耗或能量交换会造成直流侧电压的波动，故必须采用合适的控制方法使直流侧电压维持恒定[7]。直流侧电压控制原理如图5所示。图5中U_{dc}为直流侧电压给定值，U_{dc}^*为直流侧电压检测值，将两者之差ΔU_{dc}送入PI调节器处理后得到调节信号Δi_{p}，将Δi_{p}与瞬时有功电流的直流分量$\bar{i}_{\mathrm{p}}$相叠加，使在运算得到的谐波电流中含有一定量的基波有功电流，从而使变流器输出的补偿电流也含有这些量，在实现APF的直流侧与电网侧能量交换的同时，能将直流侧电压调

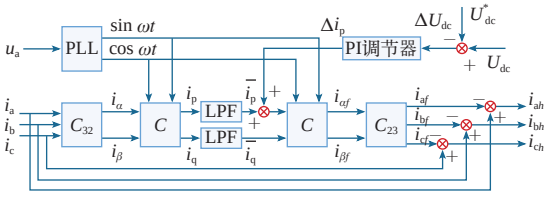


图5　直流侧电压控制原理图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

节到给定值。

PI调节器结构如图6所示。

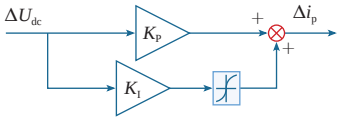
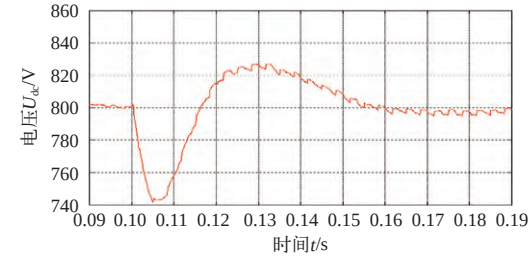


图6 PI调节器结构

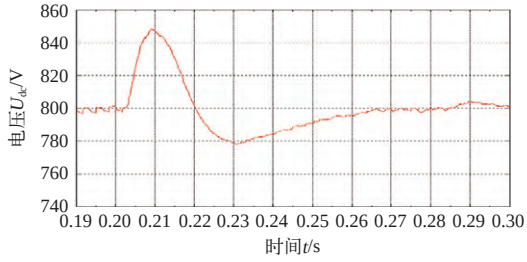
结构满足：$\Delta i_p = K_P \Delta U_{dc} + K_I \int_0^t \Delta U_{dc}\,dt$，其中$K_P$为PI控制器的比例系数，$K_I$为积分时间常数。

APF直流侧电压仿真

通过Matlab仿真，对基于PI调节的直流侧电压控制方法建立仿真模型。其中仿真模型的相关参数设置如下：三相电压为380 V/50 Hz，直流侧电容为1.65 mF，主控开关管选用IGBT管反并联二极管，APF输出电感为4.5 mH；整流桥负载电阻值为15 Ω，电感值为1 mH。APF系统谐波检测部分采用基于瞬时无功功率理论的$i_p - i_q$法，补偿电流部分采用基于SVPWM电流控制，直流侧电压的给定值设为800 V。图7为APF突加和突减负载直流侧电压波动波形。



（a）突加负载直流侧电压



（b）突减负载直流侧电压

图7 PI调节直流侧电压波动仿真波形

直流侧电压控制策略改进

由于电网中的谐波呈非线性且实时变化，而常规PI调节器没有在线整定K_P、K_I的功能，这使得系统不能在不同偏差下对PI参数进行自整定，从而不能进一步提高其控制的效果。为了达到进一步提高控制准确度和效果的目的，这里将PI控制器换成模糊自适应PI控制器。在常规PI控制的基础上，参数自适应模糊PI控制利用模糊逻辑推理理论建立PI参数ΔK_P、ΔK_I与偏差绝对值e和偏差变化率ec之间的二元函数关系：$\Delta K_P = f_1(e,ec)$，$\Delta K_I = f_2(e,ec)$，并根据不同情况下的e、ec，对参数K_P、K_I进行调节。其中设定模糊输入变量、输出变量的语言值集合均为｛NB（负大），NM（负中），NS（负小），ZO（零），PS（正小），PM（正中），PB（正大）｝。考虑到对论域的覆盖程度和准确性，模糊语言变量NB取Z形隶属度函数，PB取S形隶属度函数，其余取三角形隶属度函数。模糊自适应PI控制器的结构如图8所示，图8中α_e为偏差e的量化因子，α_{ec}为偏差变化率ec的量化因子。在参数自调节模糊PI控制下，控制器输出变量K_P、K_I的值可以表示为$K_P = K_P^* + \Delta K_P$，$K_I = K_I^* + \Delta K_I$，其中K_P^*、K_I^*分别为PI控制器K_P、K_I参数的初始值，ΔK_P、ΔK_I分别为二维模糊控制器的输出值。图8中U_{dcr}为直流侧电压的给定值，U_{dcs}为直流侧电压的实际值。

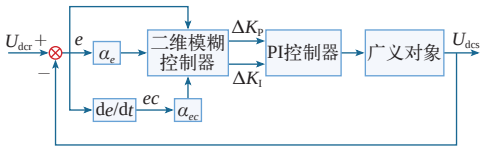


图8 模糊自适应PI控制器的结构

图9为模糊自适应PI控制的仿真建模。二维模糊控制器采用Matlab提供Fuzzy Logic Toolbox仿真工具箱，取偏差量化因子$\alpha_e = 0.075$，偏差量变化率量化因子$\alpha_{ec} = 0.075$，输出比例因子分别为0.06和0.3，模糊推理算法选择Mamdani推理法，解模糊方法选择加权平均法。图10为APF在模糊自适应PI调节器控制下突加和突减负载直流侧电压波动波形。

从仿真结果可以看出，与常规PI调节器相比，模糊PI调节器由于采用PI参数自调节，使得在该方

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

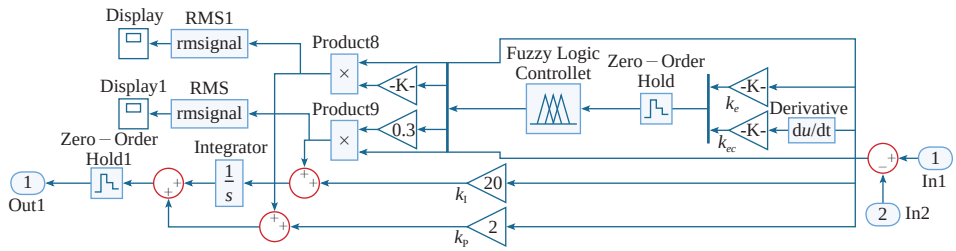
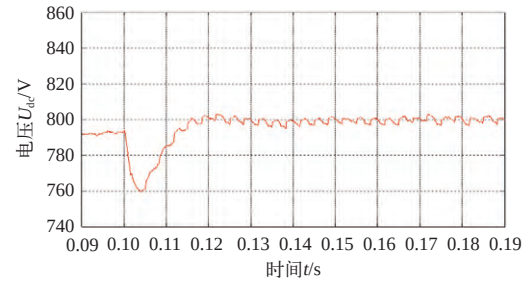
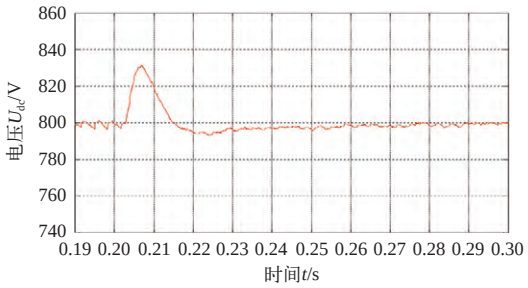


图9　模糊自适应PI调节器仿真建模



（a）突加负载直流侧电压



（b）突减负载直流侧电压

图10　模糊自适应PI控制直流侧电压波动仿真波形

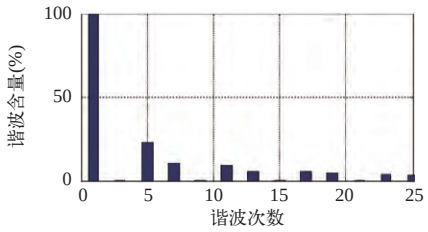


图11　负载电流频谱分析图

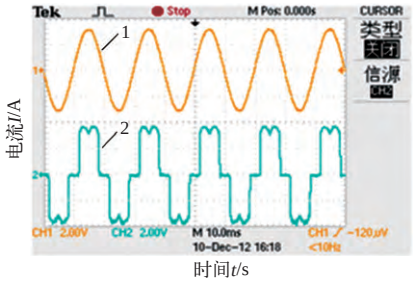


图12　补偿后源侧与负载侧电流波形图

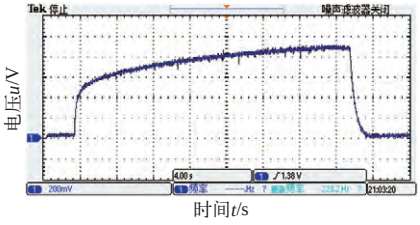


图13　软起动过程中直流侧电容电压波动波形

法下的电压超调量较小、响应较快，特别是在负载突变情况时能满足直流侧电压控制要求，其效果明显优于传统PI控制方法。

实验结果

根据APF控制方法，采用主控芯片为TMS320 F28335型DSP，以完成检测与补偿控制功能。搭建实验系统模型，实验参数为：电网线电压380 V，频率50 Hz，交流输出电感2 mH，直流侧电容4 700 μF，电容电压800 V。主电路功率开关器件采用IPM模块（三菱PM75RL1A120）。负载采用整流桥带电阻负载。电流检测采用i_p-i_q检测法；电流控制采用空间电压矢量控制；直流侧电压控制采用模糊自适应PI控制。负载电流谐波畸变率THD＝21.6%，谐波主要集中在$6n\pm1$特征次谐波上。负载电流频谱如图11所示，图12、图13为APF实验的各实验波形。

图12中，波形1为补偿后电网侧电流波形，波形2为负载电流波形；图13为APF系统软起动过程中直流侧电容电压波动波形。从以上实测波形可以看出，APF能准确分离出谐波分量，在负载突变情况时能够满足对直流侧电压控制的要求，并能够实时控制其补偿电流输出，总体补偿效果非常好。

结束语

本文在分析了基于电压空间矢量脉宽调制电

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

流控制方法和基于PI调节法的直流侧电压控制策略的基础上，建模并仿真的结果体现了模糊自适应PI调节在直流侧电压控制具有明显的优势。仿真和实验的结果也验证了所设计的补偿电流控制方法和直流侧电压控制策略的有效性。此外，针对模糊自适应PI控制器更好地适用于APF的模糊控制规则表及系统检测与全数字化控制的实现是以后努力的方向。

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]．北京：机械工业出版社，2005：40-45．

[2] 钟山，杨晟，赵争鸣．有源电力滤波器技术与发展综述 [J]．变频器世界，2011 (1)：45-49．

[3] Thomas T，Haddad K，Joos G．Design and performance of active power filters [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，1998 (4)：21-31．

[4] Vodyakho O，Kim T，Kwak S．Comparison of the space vector current controls for shunt active power filters [J]．IET Power Electronics，2009，6 (2)：653-664．

[5] 张竹，张代润，王超，等．有源电力滤波器定频滞环电流控制新策略 [J]．电力系统及其自动化，2010，22 (2)：82-85．

[6] 郭自勇，周有庆，刘宏超，等．一种基于电压空间矢量的有源滤波器滞环电流控制新方法 [J]．电工技术学报，2007，27 (1)：112-117．

[7] 陈仲．并联有源电力滤波器实用关键技术的研究 [D]．杭州：浙江大学，2005．

（收稿日期：2014－08－19）EA

Weidmüller

魏德米勒风电照明解决方案
—— 高效、可靠、高性价比的完美融合

魏德米勒为全球客户和合作伙伴提供高品质的风电照明解决方案。
魏德米勒风电照明解决方案立足客户的实际需求和产品特性，针对性的提供个性化解决方案，高效、可靠、性价比高。可以为风机内部提供供电和照明一站式解决方案。
您之成功，我们力助

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008　网址: www.weidmueller.com.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net