三相四线并网变流器分裂电容电压不均衡控制策略

建立了变流器的开关函数模型，推出电压不均衡与中线电流直流分量的关系，分析了滞环电流控制方式下硬件通道直流偏置分量对分裂电容电压不均衡的作用机理及不均衡进入稳态的原因，提出在传统的闭环控制结构中增加分裂电容电压偏差控制环路，根据偏差量的大小得到相应的补偿直流量，叠加到滞环电流控制指令。仿真分析了不均衡现象，并验证了所提策略的有效性。

代同振　周宏林　吴小田　于海坤／中国东方电气集团有限公司中央研究院

代同振／工程师

关键词／Keywords
分裂电容·
电压不均衡·
三相四线·
滞环电流控制·

0　引言

基于全控型功率器件的并网变流器在新能源发电、电能质量校正等领域得到了广泛应用，图1为三相四线并网变流器结构图。从工程设计角度，交流侧中点，即变压器绕组中点接地主要基于绝缘和短路保护的考虑；直流侧中点，即两个分裂电容间引出导线接地有助于消除正负母线间的共模干扰，同时可起到防雷保护的作用。从系统控制的角度，相比三相三线结构，由于中线的引入，一方面使得三相电流能独立调节，其各相开关函数引起的高次谐波互不干扰；另一方面，增加了零序电流控制变量，便于大功率多重化结构环流抑制及三相电网电压不平衡工况控制[1-3]。但同时使得正、负分裂电容存在独立的充放电回路，带来分裂电容电压不均衡的问题，对变流器并网性能及电容器的寿命存在不利影响。

文献[2-4]在传统矢量控制的基础上，提出了分裂电容电压不平衡算法。文献[5-6]针对单相半桥PFC结构，比较了附加电压环和双电压环两种方式对消除分裂电容电压不均衡的效果，也有学者提出了用二阶低通滤波器取代传统PI控制器的新型电压控制策略[7]。而在新能源发电领域，目前不少并网变流器采用基于硬件模拟电路实现的滞环电流控制结构，没有文献对此进行详细分析。本文针对滞环电流控制的三相四线并网变流器，建模分析了分裂电容电压不均衡的原因，指出滞环比较硬件电路存在的直流偏置造成分裂电容电压不均衡的作用机理，并分析不平衡幅度达到平衡状态的原因，进而提出不平衡电压控制算法，最后通过仿真进行了验证。

1　典型控制结构

图1的三相四线并网变流器有多种控制方式，其中矢量控制为常用的控制方案，其通过旋转坐标变换将静止坐标下的三相交流量变为直流量，并引入解耦

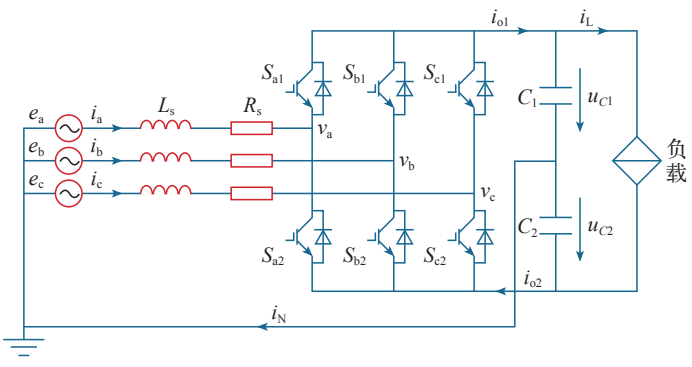


图1　三相四线并网变流器结构图

机制，使得原本复杂、耦合的控制系统变为针对直流量的单输入、输出结构，然后再通过SPWM/SVPWM调试方式得到驱动脉冲信号。值得一提的是，由于中线的存在，三相三线结构中所用的二维SVPWM调试算法不再适用，很多文献对此进行了深入研究，提出了相应的三维空间矢量脉宽调制算法，来解决二维SVPWM算法不能控制零轴分量的问题[8]。

相比于矢量控制方式，滞环电流控制是一种典型的非线性控制，其特点是控制系统结构简单，由于是瞬时电流反馈控制，因此具有快速的动态响应特性，控制运算无须电路参数，并网电流的畸变可以始终保持在一个给定的容差范围内，不受电网电压波动和负载变化的影响，有较好的系统稳定性。而且用模拟器件很容易实现，所以获得了广泛的应用[9]。典型的控制结构框图如图2所示（不包括虚线回路部分）。

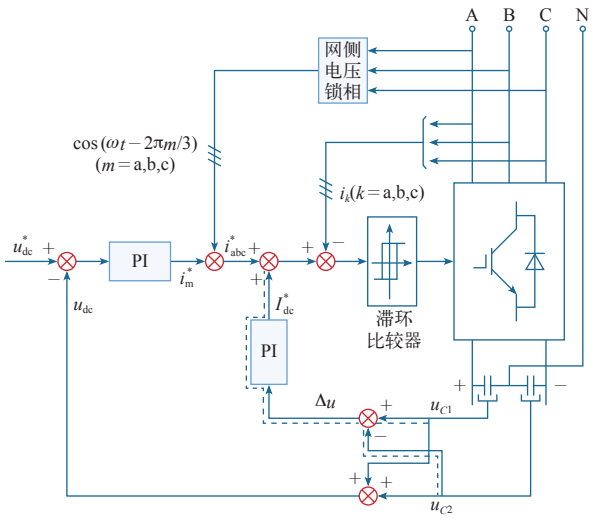


图2　滞环控制结构框图

直流母线电压外环用来控制母线电压的稳定，其输出为指令电流的幅值i^*_m，其符号根据负载性质变化，控制电流的双向流动；再通过网侧电压锁相环节赋予指令电流相位信息，用来控制系统的功率因数；三相指令电流分别与相应的三相反馈电流送入滞环比较器生成PWM信号，驱动IGBT模块。滞环带宽越小，驱动脉冲频率越高，并网电流波形越接近正弦。

2　分裂电容电压不均衡分析

图1的电路结构中，e_a、e_b和e_c为电网相电压，i_a、i_b、i_c和i_N为电网相电流及中线电流，L_s为并网电感，R_s为线路等效电阻，v_a、v_b和v_c为交流侧电压，i_{o1}、i_{o2}为正负母线电流，u_{C1}、u_{C2}分别为正负分裂电容C_1、C_2两端的电压，i_L为等效负载电流。

为便于分析与简化系统模型，作如下假设。

1）开关器件均为理想器件，无开关延时和导通电压降。

2）三相输入电源为理想的对称电压源。

3）同一桥臂上下开关管互补导通，不存在死区时间。

4）两直流输出滤波电容均为理想电容，且电容值相等，即 $C_1=C_2=C$。

三相各桥臂的开关函数定义为

$$S_k=\begin{cases}1,\ k\text{相的上管开通}\\0,\ k\text{相的下管开通}\end{cases}\quad k=\mathrm{a,b,c}\qquad(1)$$

从而并网变流器三相交流侧电压、电流可表示为

$$\begin{cases}v_a=S_au_{C1}+(S_a-1)u_{C2}\\v_b=S_bu_{C1}+(S_b-1)u_{C2}\\v_c=S_cu_{C1}+(S_c-1)u_{C2}\\i_{o1}=S_ai_a+S_bi_b+S_ci_c\\i_{o1}=(S_a-1)i_a+(S_b-1)i_b+(S_c-1)i_c\end{cases}\qquad(2)$$

应用基尔霍夫电压定律（KVL）和基尔霍夫电流定律（KCL）可得如下模型，即

$$\begin{cases}e_a-L_s\dfrac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t}-R_si_a=S_au_{C1}+(S_a-1)u_{C2}\\e_b-L_s\dfrac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t}-R_si_b=S_bu_{C1}+(S_b-1)u_{C2}\\e_c-L_s\dfrac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}t}-R_si_c=S_cu_{C1}+(S_c-1)u_{C2}\\C\dfrac{\mathrm{d}u_{C1}}{\mathrm{d}t}=S_ai_a+S_bi_b+S_ci_c-i_L\\C\dfrac{\mathrm{d}u_{C2}}{\mathrm{d}t}=(S_a-1)i_a+(S_b-1)i_b+(S_c-1)i_c-i_L\end{cases}\qquad(3)$$

从而可得

$$C\frac{\mathrm{d}\Delta u}{\mathrm{d}t}=i_a+i_b+i_c=i_N\qquad(4)$$

式中，Δu为分裂电容电压不均衡度。可以看出，中线电流i_N是导致正负电压不均衡的根本原因。具体而言，i_N中的直流分量导致不均衡度不断累积，而周期性的交流零序分量只会导致偏差的周期波动，而不会影响不均衡幅度的积累。

对于理想的电路模型，i_N中是不存在直流分量的，从而不存在分裂电容不均衡的问题。但是对于实际的滞环控制系统，模拟量采样及滞环比较环节都是通过硬件电路来实现的，由于电源准确度、器件准确度等原因，在控制系统的模拟量通道，不可避免地会存在少量的直流偏置分量。当给定电流通道的直流偏置量和反馈电流通道的直流偏置量相等时，滞环调制得到的实际电流与理想情况一致，即实际电流不存在直流偏置量；当给定电流通道的直流偏置量和反馈电流通道的直流偏置量不相等时，这两个直流分量的差值会最终反映在实际电流上。各相电流存在的直流分量最终叠加反映在中线电流i_N中，从而导致分裂电容出现不均衡，且随着时间的累积，不均衡度不断增加。

随着分裂电容电压不均衡度Δu的增加，正、负分裂电容电压幅值低于网侧相电压幅值时，在电流波峰或波谷处会出现不受控的情况，从而使得调制出来的实际电流等效补偿了一个相反的直流偏置分量，使中线上原有的直流偏置电流消失，直流母线电压不均衡达到稳态，第4节的仿真对此进行了验证。

3 均压控制策略

通过上面的分析可以看出，在控制系统环路存在直流分量时，虽然电压不均衡度会达到一个平衡状态，但是这种平衡状态将导致系统控制性能变差，并网电流畸变严重，电容耐压裕度减小等后果。为此必须设计相应的控制回路，主动维持分裂电容电压均衡。

根据式（4），分裂电容电压的不均衡是由中线电流i_N中的直流分量造成的，而这些直流分量为三相电流直流分量的叠加，从而提出如下控制方案，如图2中虚线部分所示。

系统实时检测分裂电容电压不均衡度Δu，偏差幅值经过PI调节器得到相应的直流偏置分量给定I^*_{dc}，与电压外环得到的三相电流给定值中i^*_{abc}叠加，通过滞环电流调制作用得到带有相反直流偏置分量的三相交流电流，从而使不均衡度逐渐减小至零。

4 仿真验证

利用Matlab建立系统仿真模型，如图3所示，其中各参数如下：电网电压e_a为311 V，网侧电感L_s为0.2 mH，直流母线电容C为0.225 F，直流母线电压为700 V，滞环带宽为30 A，0.3 s系统加载（并网电流）。

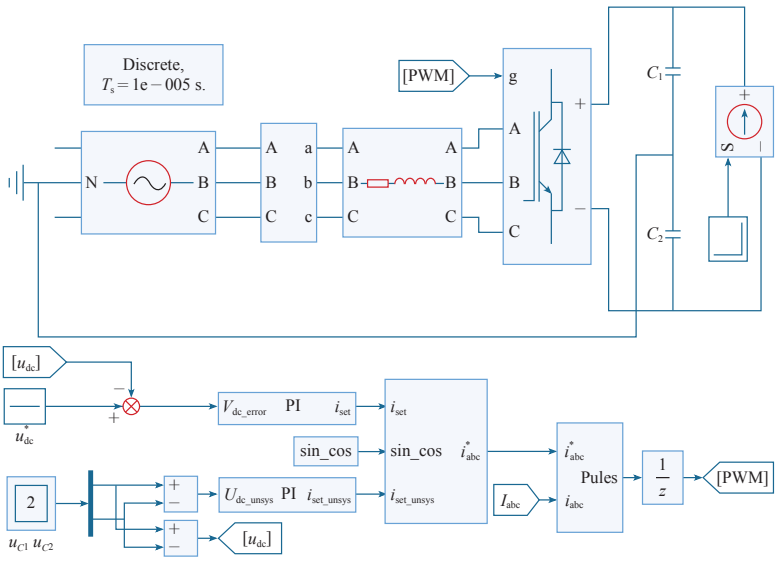
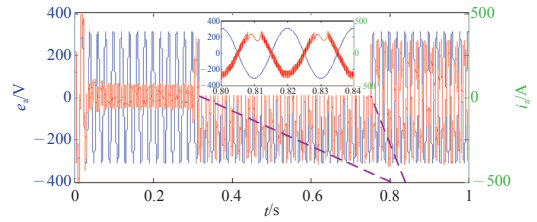


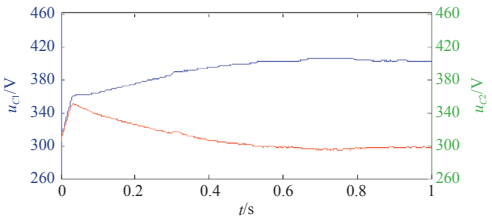
图3 系统仿真模型

为模拟实际系统中硬件电路环节导致的直流偏置，在仿真模型控制回路中加入直流偏置分量，三相偏置量给定分别为10 A、20 A和30 A，其他条件不变，仿真结果如图4所示。

从图4中可以看出，当控制回路中存在直流偏置分量时，分裂电容电压出现不均衡，当其中一个电压幅值下降到电网电压幅值以下时，电流开始出现不受控的情况。在0.8 s以后，u_{C2}降低到300 V



（a）电网电压e_a和并网电流i_a

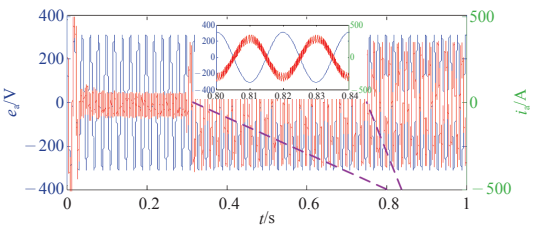


（b）分裂电容电压u_{C1}和u_{C2}

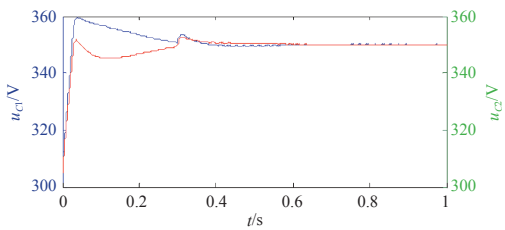
图4　电压不均衡仿真

左右，在电网电压的波谷附近，为使实际电流跟踪指令正向增加，此时图1中的A相桥臂下管S_{a2}开通，但是由于此时u_{C2}的幅值小于电网电压e_a的幅值，实际电流反而往相反的趋势变化，即正向减小，该变化引入的等效直流偏置量与系统存在的直流偏置分量作用相互抵消，从而使i_N中的直流分量变为零，分裂电容不均衡度达到一种平衡状态。为消除电压不均衡对系统造成的不利影响，采用所提的不均衡控制策略，仿真结果如图5所示。

从图5中可以看出，当分裂电容电压出现不均衡时，所提出的控制策略能迅速起作用，将不均衡度逐渐缩小到零，使系统的控制特性得到改善，消除了直流偏置分量对系统的不利影响。



（a）电网电压e_a和并网电流i_a



（b）分裂电容电压u_{C1}和u_{C2}

图5　均压控制仿真

5　结束语

针对三相四线并网变流器分裂电容不均衡问题，建模分析其根本原因，并简要介绍了滞环电流控制方式下，硬件回路中的直流偏置分量的作用机理及不均衡幅度进入稳态的原因。仿真验证了推理的正确性及所提不均衡控制策略的有效性。

参考文献

[1] Ghosh R，Narayanan G．Control of three-phase，four-wire PWM rectifier [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2008，23 (1)：96-106．

[2] 陈瑶，金新民，童亦斌．三相四线系统中三相电压型PWM整流器控制策略 [J]．电工技术学报，2007，22 (7)：64-68．

[3] 徐凯，梁晖，朱宁．分裂电容式PWM整流器的矢量控制策略研究 [J]．电力电子技术，2008，42 (4)：71-73．

[4] 石健将，杨永飞，王文杰，等．数字控制400 Hz三相四线高功率因数PWM 整流器研究 [J]．电工技术学报，2012，27 (5)：143-148．

[5] Lo YuKang，Song TzuHemg，Chiu HuangJen．Analysis and elimination of voltage imbalance between the split capacitors in half-bridge boost rectifiers [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2002，49 (5)：1175-1177．

[6] 刘征威，孙丽娜，陈新．全数字半桥PWM整流器电容均压控制策略研究 [J]．电力电子技术，2010，44 (2)：92-94．

[7] 冯霞，钟晓剑，徐群伟，等．新型三相四线制APF直流电压控制策略 [J]．浙江大学学报：工学版，2014，48 (7)：1312-1317．

[8] 陈瑶，金新民，童亦斌．三相四线系统中SPWM和SVPWM的归一化研究 [J]．电工技术学报，2007，22 (12)：122-127．

[9] 叶斌．电力电子应用技术 [M]．北京：清华大学出版社，2006．

（收稿日期：2016－02－17）EA