

基于 PD-SFO-PWM 的级联 SAPF 直流侧平衡策略

汪玉凤¹, 狄天拓¹, 高之成², 叶青²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;
2. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对级联 H 桥并联有源电力滤波器(SAPF)存在直流侧电压不平衡的现象,以实现直流侧电压的稳压、相间平衡和相内平衡为目的,提出一种基于载波同相层叠-开关频率优化-PWM (PD-SFO-PWM)的直流侧电压三级平衡策略。当发生直流侧电压失衡时,三级策略发挥调节作用。与传统平衡策略相比,该策略原理简单、易于实现,由于调制策略同时兼有调制功能和直流侧相内电压平衡功能,避免了设计额外的直流侧相内电压平衡策略,从而大大降低了直流侧平衡策略的复杂性。最后进行七电平 SAPF 仿真和实验,验证了平衡策略的可行性。该平衡策略能够在较短的时间内,以较小的超调量实现平衡效果,并能保证 SAPF 的稳定工作。

关键词: 级联 H 桥; 并联有源电力滤波器; 直流侧电压不平衡; PD-SFO-PWM; 三级平衡策略

DOI: 10.12067/ATEEE1801004 **文章编号:** 1003-3076(2019)06-0033-09 **中图分类号:** TM464

1 引言

级联 H 桥拓扑目前成为大功率、高电压等领域应用较多的一种结构^[1-4],其具有较易实现、高可靠性和结构上易于模块化扩容等特点。其中采用级联 H 桥多电平拓扑的并联有源电力滤波器(Shunt Active Power Filter, SAPF)引起了越来越多关注^[5-10]。

但是在级联 H 桥 SAPF 中,由于各个 H 桥电容具有独立性,H 桥的串联损耗以及并联损耗等具有差异性,使得 SAPF 直流侧产生不平衡问题^[11,12]。这必然会造成 SAPF 不能很好地对电流进行补偿,以及影响稳定运行等,所以直流侧电压平衡是研究的重点。

保证直流侧的平衡主要从两个方面切入:①通过引入外部硬件电路实现电压平衡^[11,13],该方法高效、可靠,且控制精度高,但硬件方法需要增加额外的电路,控制和结构上加大了复杂度,成本也会提高;②通过平衡控制算法来实现平衡。文献[14]提出一种无源性的直流侧平衡策略,但该策略有可能导致三相输出电压不均衡。文献[15]采用交换调

制方式的方法,但该方法只能用于开关频率较低、载波比较小的情况。文献[16]通过分层控制来实现平衡,但该方法控制量较多,难以调整。文献[17]通过叠加 H 桥电压误差信号实现相内电压平衡,但是当级联数目大时,会增加算法复杂性。文献[18,19]借助注入负序电流来达到均衡相间的目的,但会引起电流畸变,影响 SAPF 补偿能力。文献[20,21]提出了一种交换脉冲的控制方法,但该方法只能用于模块参数相差不大的情况。

本文提出载波同相层叠-开关频率优化-PWM (Phase Disposition-Switching Frequency Optimal-PWM, PD-SFO-PWM)策略,该策略同时拥有载波同相层叠以及开关频率优化 PWM 策略的优势,并且将多路载波减少为一路载波,简化了调制策略。在 PD-SFO-PWM 策略的基础上,又提出三级策略来实现直流侧平衡,分别为基于叠加直流有功电流的直流侧稳压策略、基于叠加基波有功电流的直流侧相间平衡策略、基于 PD-SFO-PWM 策略的直流侧相内平衡策略,相较于其他直流侧平衡策略,本策略复杂程度大大降低。最后通过仿真验证其可行性。

收稿日期: 2018-01-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51307076)、辽宁省教育厅一般项目(L2015213)
作者简介: 汪玉凤(1962-),女,河北籍,教授,硕士,研究方向为节能型电力电子技术及应用;
狄天拓(1992-),男,河北籍,硕士研究生,研究方向为节能型电力电子技术及应用。

$$u_{\text{zero}} = \frac{1}{2} [(u_A, u_B, u_C)_{\text{max}} + (u_A, u_B, u_C)_{\text{min}}] \quad (1)$$

式中, u_{zero} 为所求零序分量; u_A, u_B, u_C 为 APF 三相调制波。通过 A 相阐述原理, 用 A 相调制波减去零序谐波, 得到 A 相马鞍调制波, 如图 4 所示。

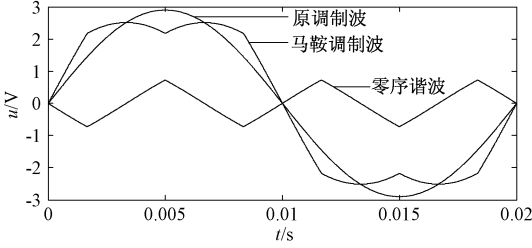


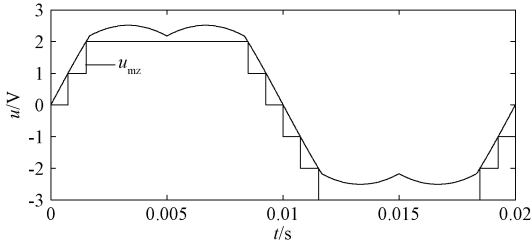
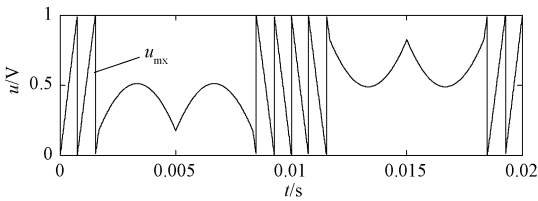
图 4 马鞍调制波

Fig. 4 Wave of saddle modulation

(2) 取得整数部分。取得马鞍调制波 u_m 的整数部分 u_{mz} 和小数部分 u_{mx} , 如图 5 和图 6 所示。

$$u_{mz} = \{n \mid u_m - 1 < n \leq u_m, \text{ 且 } n \in \mathbb{Z}\} \quad (2)$$

$$u_{mx} = u_m - u_{mz} \quad (3)$$

图 5 u_{mz} 波形Fig. 5 Wave of u_{mz} 图 6 u_{mx} 波形Fig. 6 Wave of u_{mx}

(3) 取得小数部分脉冲信号。为了获取小数部分脉冲 p_x , 使用 u_{mx} 与三角载波 u_z 进行比较, 载波比为 20, u_z 波形如图 7 所示。 p_x 波形如图 8 所示。

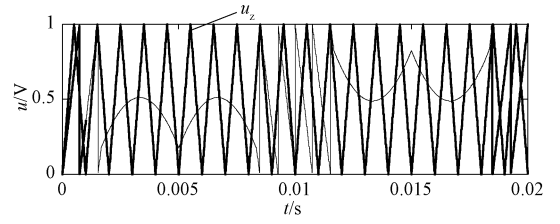
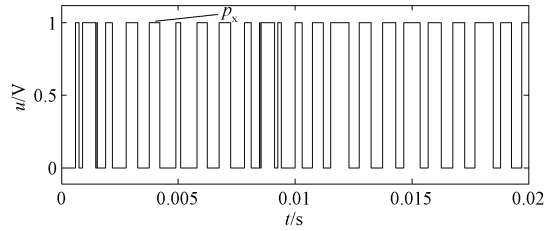
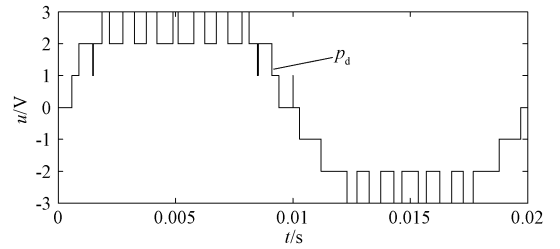
p_x 表达式为:

$$p_x = \begin{cases} 1 & u_{mx} > u_z \\ 0 & u_{mx} \leq u_z \end{cases} \quad (4)$$

(4) 取得多电平信号。 u_{mz} 与 p_x 相加, 取得多电平信号 p_d :

$$p_d = p_x + u_{mz} \quad (5)$$

p_d 波形如图 9 所示。

图 7 u_z 波形Fig. 7 Wave of u_z 图 8 p_x 波形Fig. 8 Wave of p_x 图 9 p_d 波形Fig. 9 Wave of p_d

如图 2 所示, S_1 与 S_2 构成 H 桥模块的左桥臂, S_3 与 S_4 构成 H 桥模块的右桥臂。当 S_1 (S_3) 导通, S_2 (S_4) 关断, 定义为状态 1。当 S_2 (S_4) 导通, S_1 (S_3) 关断, 定义为状态 0。则第 N 个 H 桥左桥臂状态被设定为 H_{2j-1} , 右桥臂被设定为 H_{2j} 。那么第一个 H 桥左桥臂状态是 H_1 , 第一个 H 桥右桥臂状态是 H_2 。同理可得, 第二个 H 桥左、右桥臂状态分别为 H_3 、 H_4 , 第三个 H 桥左、右桥臂状态分别为 H_5 、 H_6 。

第 j 个 H 桥的左右桥臂状态差定义为 M_j , 即

$$M_j = H_{2j-1} - H_{2j} \quad (6)$$

$$M_j = \begin{cases} 1 & H_{2j-1} = 1, H_{2j} = 0 \\ 0 & H_{2j-1} = H_{2j} \\ -1 & H_{2j-1} = 0, H_{2j} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

A相各H桥输出电压 u_{raj} 可以由式(8)得到:

$$u_{raj} = M_j u_{dc} i_{caj} \quad (8)$$

第 j 个H桥的功率 p_j 为:

$$p_j = u_{raj} i_{ca} = M_j u_{dc} i_{ca} \quad (9)$$

第 j 个H桥功率增量 Δp_j 为:

$$\Delta p_j = \Delta M_j u_{dc} i_{ca} \quad (10)$$

定义 M_z 为A相各开关状态之和:

$$M_z = M_1 + M_2 + M_3 \quad (11)$$

定义 ΔM_z 为各状态增量 ΔM_j 之和:

$$\Delta M_z = \Delta M_1 + \Delta M_2 + \Delta M_3 \quad (12)$$

通过比较多电平信号 p_d 与 M_z ,从而获得了A相的开关状态增量,随后再进行具体的开关状态分配,具体如下:

- (1) 当 $p_d > M_z$, $\Delta M_z = 1$, 从而增大 M_z 。
- (2) 当 $p_d = M_z$, $\Delta M_z = 0$, M_z 不变。
- (3) 当 $p_d < M_z$, $\Delta M_z = -1$, 从而减小 M_z 。

4 级联H桥SAPF直流侧平衡策略

本文提出一种应用于级联H桥SAPF直流侧电压不平衡情况下的三级平衡策略,分别为直流侧稳压策略、相间平衡策略、相内平衡策略。

有关级联H桥直流侧电压三级平衡控制策略的实现方案已有研究,例如文献[22]从三个层面来实现直流侧电压的平衡,文献的上层功率控制策略对应于本文的直流侧稳压策略,但是上层功率控制策略采用d-q双闭环前馈解耦控制,而本文的直流侧稳压策略仅需叠加直流有功电流,不需要前馈解耦,简化了控制策略的复杂性;文献的相间电容电压平衡控制策略对应于本文的直流侧相间平衡策略,相间电容电压平衡控制策略通过改变各相调制比和移相角来平衡相间电容电压,但计算过程十分繁杂,而本文的直流侧相间平衡策略仅需叠加基波有功电流,使控制策略免于大量繁杂的计算;文献的同相模块间电容电压平衡控制策略对应于本文的直流侧相内平衡策略,同相模块间电容电压平衡控制策略通过改变各H桥调制比和移相角来平衡各H桥电容电压,计算同样繁杂,而本文方法并未设计额外的相内电压平衡策略,其相内电压平衡是通过PD-SFO-PWM调制策略中使得H桥开关管状态增量之和 ΔM_z 趋于零来完成的,在实现调制策略的同时也兼带达到了相内电压平衡的目的。综上所述,本文的直流侧三级平衡策略原理简单、易于实现,相较已有的平衡策略,该策略的复杂性得到了大大简化。

4.1 直流侧稳压策略

稳压策略的目的是稳定全局电压,使各H桥电容电压均值趋于额定电压。直流侧稳压策略本质是系统侧与逆变器交流侧进行有功能量的交换,然后逆变器交流侧与直流侧通过开关管的动作进行有功能量的交换。所以要进行直流侧稳压,实质是对逆变器直流侧的有功能量进行动态控制,使其稳定在额定值附近。

为了稳定全局电压,提出基于叠加直流有功电流的直流侧稳压策略,如图10所示。其中, u_{dc}^* 为H桥电容额定电压, $\sum_{i=1}^N u_{dcai}$ 、 $\sum_{i=1}^N u_{dcbi}$ 、 $\sum_{i=1}^N u_{dcci}$ 分别为每相H桥电容电压之和,即每相的相间直流侧电压。 u_{dc}^* 与三相全部H桥的电容电压均值作差,得到 Δu ,其再经过PI调节器,从而得到直流有功电流补偿量 Δi_p ,最后叠加到图3中的 \bar{i}_p 。当均值偏低时,叠加一个与 \bar{i}_p 同向的分量。反之,叠加一个反向的分量。

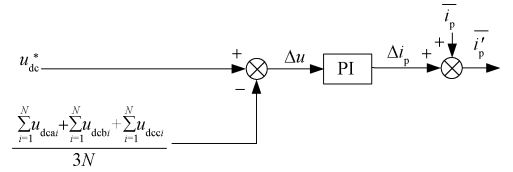


图10 直流侧稳压策略

Fig. 10 Strategy of stabilizing DC voltage

4.2 直流侧相间平衡策略

该策略的目的是在稳定全局电压,系统侧与逆变器直流侧有功能量交换平衡后,使得有功能量在三相间均衡分布,三相的相间直流侧电压值相等。

为了实现相间平衡,提出基于叠加基波有功电流的直流侧相间平衡策略,如图11所示。三相相间直流侧电压均值减去各自的相间直流侧电压值,然后经过PI调节后,再乘上通过锁相环得到的正弦量,即得到一个基波有功电流信号,通过将此信号与图3中的负谐波电流叠加,改变有功电流指令,使相间直流侧电压值得到调节。

4.3 直流侧相内平衡策略

相内各H桥电容电压值相等是通过执行相内平衡策略来达成的。而本文提出基于PD-SFO-PWM策略的相内平衡策略,即通过PD-SFO-PWM调制策略使得H桥开关管状态增量之和 ΔM_z 趋于零来达成相内平衡,在实现调制策略的同时也使得相内电压平衡,避免了设计额外的相内平衡策略。如第3节所述,确定A相的开关状态增量,然后再

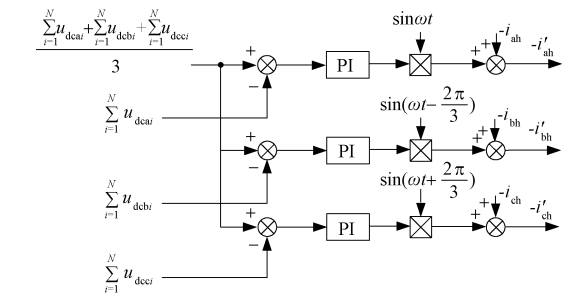


图 11 直流侧相间平衡策略

Fig. 11 Strategy of balancing DC voltage among phases

进行具体的开关状态分配。但是开关动作方案往往不止一种,方案的选择不仅关系到能否顺利完成 PD-SFO-PWM 策略,更重要的意义在于能否使相内平衡。

该策略首先要对相内所有的 H 桥电容电压值进行比较,然后根据状态增量之和 ΔM_z 来进行接下来的操作:

- (1) $\Delta M_z = 0$ 。 M_z 不变,开关状态不改变。
- (2) $\Delta M_z = 1$ 。若补偿电流 $i_c > 0$,由式(10)可知,该 H 桥的功率增量为正,选择一个开关状态 M 为 -1 或 0 的 H 桥。而当满足条件的 H 桥不止一个时,选择直流侧电压值最低的 H 桥,使它的 M 增加,增加其直流侧电压,重复此操作,直至 $\Delta M_z = 0$ 。若补偿电流 $i_c < 0$,由式(10)可知,该 H 桥的功率增量为负,在开关状态 M 为 -1 或 0 的 H 桥中,选择直流侧电压值最高的 H 桥,使它的 M 增加,降低其直流侧电压,重复此操作,直至 $\Delta M_z = 0$ 。
- (3) $\Delta M_z = -1$ 。若补偿电流 $i_c > 0$,该 H 桥的功率增量为负,在开关状态 M 为 1 或 0 的 H 桥中,选择直流侧电压值最高的 H 桥,使它的 M 减少,降低其直流侧电压,重复此操作,直至 $\Delta M_z = 0$ 。若补偿电流 $i_c < 0$,该 H 桥的功率增量为正,在开关状态 M 为 1 或 0 的 H 桥中,选择直流侧电压值最低的 H 桥,使它的 M 减少,增加其直流侧电压,重复此操作,直至 $\Delta M_z = 0$ 。

通过实现 PD-SFO-PWM 调制策略,相内的 H 桥电容电压值得到了合理的调整,从而达成相内平衡。

5 仿真实验

使用 Simulink 仿真平台,在 SAPF 七电平模型的背景下进行验证。系统参数如表 1 所示。

5.1 情形 1:仅投入直流侧相内平衡策略

图 12 为仅投入相内平衡策略下的 A 相三个 H

表 1 仿真参数	
Tab. 1 Simulation parameters	
参数	数值
电网电压/V	380
频率/Hz	50
交流侧电感值 L_s /mH	5
APF 侧电感值 L /mH	1
非线性负载电阻值/ Ω	2
非线性负载电感值/mH	2
直流侧电容值/ μ F	2200
直流侧额定电压值/V	240
级联数 N	3
载波频率/kHz	5

桥电容电压波形。可以看出,相内平衡策略起到很好的平衡功能,三个波形几乎重合。但是由于没有投入稳压策略,三个直流侧电压波形呈发散状态,随着时间的增加不断增大,超过直流侧额定值 240V。当电压增大到一定程度时,SAPF 会失去稳定性,不能稳定工作。

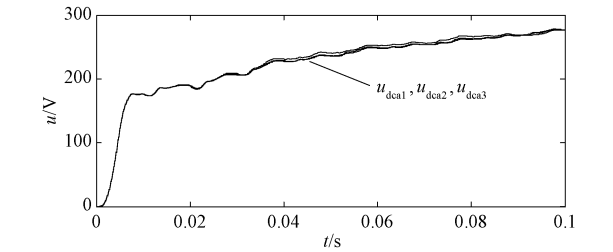


图 12 A 相各 H 桥电容电压 (情形 1)

Fig. 12 H-bridge capacitor voltages of phase A (example 1)

5.2 情形 2:同时投入直流侧稳压策略与相内平衡策略

图 13 为同时投入稳压策略与相内平衡策略下的 A 相三个 H 桥电容电压波形。可以看出,由于投入了稳压策略,三个 H 桥电容电压达到平衡,但是超调量过大。

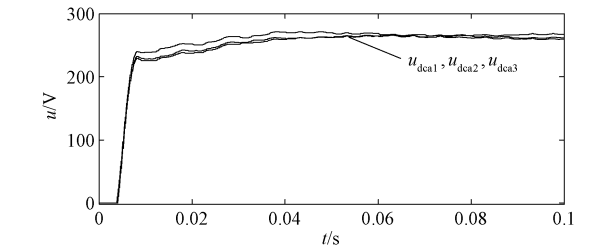


图 13 A 相各 H 桥电容电压 (情形 2)

Fig. 13 H-bridge capacitor voltages of phase A (example 2)

图 14 为各相间直流侧电压 u_{axj} 、 u_{bxj} 、 u_{cxj} 波形。

由图 14 可知,由于没有投入相间平衡策略,导致了相间失衡。

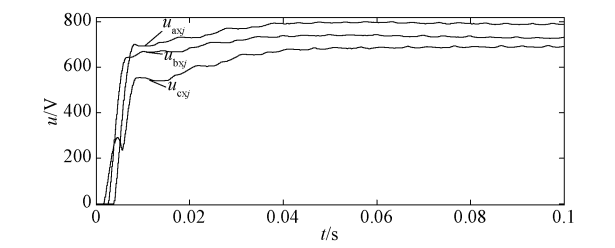


图 14 三相相间直流侧电压(情形 2)
Fig. 14 DC voltage among three phases (example 2)

5.3 情形 3:直流侧三级平衡策略全部投入

图 15 为直流侧三级平衡策略全部投入后 A 相三个 H 桥电容电压波形。由图 15 可知,A 相 H 桥电容电压在很短的时间内平衡,而且基本没有超调,A 相三个 H 桥电容电压的最大超调量只有 2.5%,很好地实现了相内平衡。

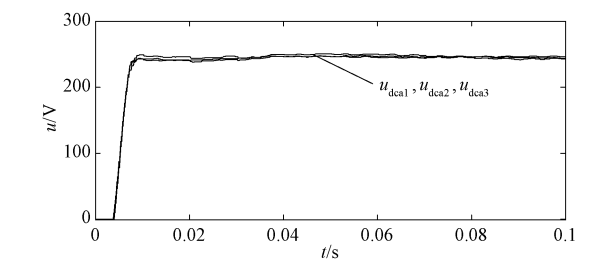


图 15 A 相各 H 桥电容电压(情形 3)
Fig. 15 H-bridge capacitor voltages of phase A (example 3)

图 16 为各相间直流侧电压波形。波形大概在 0.04s 进入稳定,在达到平衡的同时,相间直流侧电压的超调量很小,A、B、C 三相最大相间直流侧电压超调量只有 1.9%,很好地实现了相间平衡。

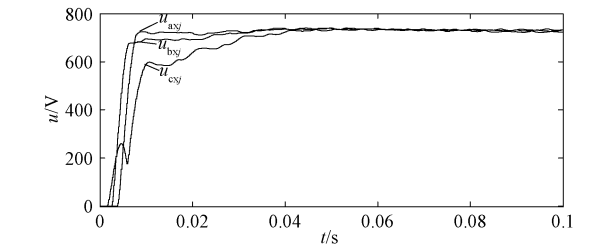


图 16 三相相间直流侧电压(情形 3)
Fig. 16 DC voltage among three phases (example 3)

6 实验验证

为进一步验证提出的直流侧平衡策略,搭建了七电平 SAPF 实验样机,样机参数如下:电网电压为

380V,频率为 50Hz;交流侧电感值 L_s 为 5mH;APF 侧电感值 L 为 1mH;非线性负载参数为 $10\Omega/5\text{mH}$;直流侧电容选型为 450V/2200 μF ;直流侧单电容电压值设定为 235V;选用英飞凌 IGBT 及其配套的驱动模块,型号参数为 1700V/100A;控制器采用 TMS320F2812 型 DSP 和 EP4CE15F17C8 型 FPGA;系统采样频率为 9.6kHz,载波频率为 5kHz。

采用直流侧三级平衡策略后,A 相两 H 桥单相电容电压波形如图 17 所示。图 18 为图 17 的右上部分放大图,黑点处的横坐标为 60ms,纵坐标为 200V。由此可知,在 120ms 时,A 相第一个和第二个 H 桥电容电压值大约为 234V 和 232V。图 19 为 A 相相间直流侧电压,即 A 相各 H 桥电容电压之和的波形,在 120ms 时,其值大约为 708V。图 20 和图 21 分别为 B 相、C 相相间直流侧电压波形,其值在 120ms 时分别为 715V 和 721V。

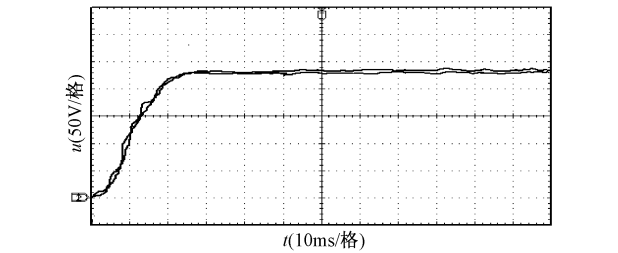


图 17 A 相两 H 桥电容电压
Fig. 17 Two H-bridge capacitor voltages of phase A

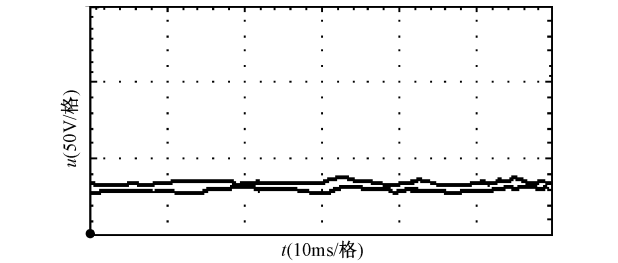


图 18 图 17 的局部放大图
Fig. 18 Partial enlargement of Fig. 17

在时间方面,直流侧电压在 25ms 左右达到平衡,虽然比仿真模型的平衡时间要长,但是也能满足 APF 的运行要求。在超调量方面,由图 18 和图 19 可知,A 相第一个和第二个 H 桥电容电压值分别为 234V 和 232V,A 相 3 个 H 桥电容电压之和为 708V,从而间接推算出 A 相第三个 H 桥电容电压为 242V,相比于 235V 的电压设定值,A 相三个 H 桥电容电压的最大超调量为 2.97%,小于 5%,很好地实现了 A 相相内平衡,即三个 H 桥电容电压值接近相

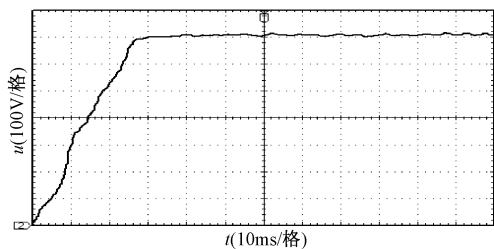


图 19 A 相相间直流侧电压

Fig. 19 DC voltage of phase A

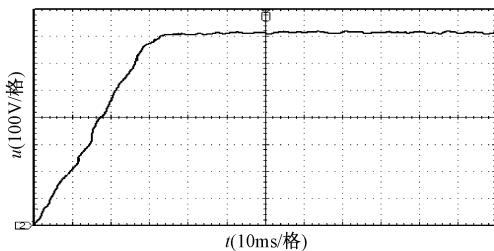


图 20 B 相相间直流侧电压

Fig. 20 DC voltage of phase B

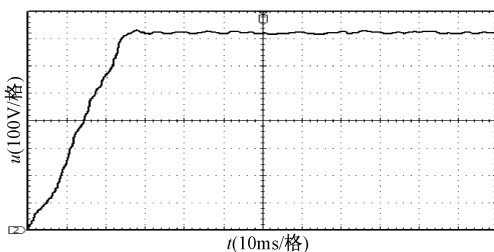


图 21 C 相相间直流侧电压

Fig. 21 DC voltage of phase C

等,并且其相对于 235V 设定值的超调量在允许范围之内。A 相 3 个 H 桥电容电压之和为 708V, B 相 3 个 H 桥电容电压之和为 715V, C 相 3 个 H 桥电容电压之和为 721V, 相比于 705V 的设定值, 三相相间直流侧电压最大超调量为 2.26%, 通过三相相间直流侧电压值及其最大超调量, 可以看出本文的直流侧相间平衡策略很好地实现了三相相间平衡, 即三相相间直流侧电压值接近相等, 并且其相对于 705V 设定值的超调量在允许范围内。此外, 将 708V、715V、721V 求和再除以 9 (即三相所有 H 桥电容电压值的平均值), 得到均值为 238.22V, 其相对于 235V 的超调量为 1.37%, 远小于 5%, 说明本文的直流侧稳压策略很好地发挥了作用。实验结果验证了本文所提出的基于 PD-SFO-PWM 的 SAPF 直流侧平衡策略的正确性与可行性。

7 结论

本文提出一种基于级联 H 桥 SAPF 的 PD-SFO-PWM 策略, 其具有很好的线电压消谐效果, 以及减小开关损耗的能力, 同时可将多路载波减少为一路载波, 简化了调制策略。对于级联 SAPF 直流侧电压失衡, 提出一种三级策略来处理失衡问题, 包含直流侧稳压策略、直流侧相间平衡策略和直流侧相内平衡策略。由于该策略原理简单、易于实现, 调制策略同时兼有调制功能和直流侧相内电压平衡功能, 避免了设计额外的直流侧相内平衡策略, 从而大大降低了直流侧平衡策略的复杂性。最后经仿真验证和实验验证, 该直流侧电压三级平衡策略能够在较短的时间内, 以较小的超调量实现平衡效果, 并能保证 SAPF 的稳定工作状态。

参考文献 (References):

- [1] 蒋蔚, 刘碧, 曹梦华, 等 (Jiang Wei, Liu Bi, Cao Menghua, et al.). 单相级联多电平 H 桥整流器有限集模型预测电流控制 (Finite-control-set model predictive current control scheme for single phase cascaded multilevel H bridge rectifiers) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (11): 36-43.
- [2] 涂春鸣, 兰征, 肖凡, 等 (Tu Chunming, Lan Zheng, Xiao Fan, et al.). 模块化电力电子变压器的设计与实现 (Design and implementation of modular power electronic transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 42-50.
- [3] 王琛琛, 李永东 (Wang Chenchen, Li Yongdong). 多电平变换器拓扑关系及新型拓扑 (Multilevel converter topologies and two novel topologies) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26 (1): 92-99.
- [4] 王俊 (Wang Jun). 级联 H 桥多电平变换器协调控制的研究 (Research on cooperative control of cascaded H-bridge multilevel converter) [D]. 北京: 中国矿业大学 (Beijing: China University of Mining and Technology), 2015.
- [5] 汪玉凤, 周宏胭, 刘存国, 等 (Wang Yufeng, Zhou Hongyan, Liu Cunguo, et al.). 基于有限控制集模型预测控制的 SAPF 的研究 (Research on SAPF based on finite control set model predictive control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering

- and Energy), 2015, 34 (2): 50-54.
- [6] Massoud A M, Finney S J, Cruden A J, et al. Three-phase, three-wire, five-level cascaded shunt active filter for power conditioning using two different space vector modulation techniques [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (4): 2349-2361.
- [7] Gao C, Jiang X, Li Y. Balance control of DC-link voltage between phases for cascade active power filter with star configuration [A]. International Conference on Electrical Machines and Systems [C]. Beijing, China, 2011. 1-5.
- [8] Maharjan L, Yamagishi T, Akagi H. Active power control of individual converter cells for a battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (3): 1099-1107.
- [9] Kunnar J, Agarwal P, Das B. Implementation of cascade multilevel inverter based STATCOM [J]. IETE Journal of Research, 2010, 56 (11): 119-128.
- [10] Escobar G, Maruinez-Montejano M F, Martinez Rodriguez P R, et al. A model-based controller for the cascade multilevel converter used as a shunt active filter [A]. IEEE 42nd Industry Applications Society Annual Meeting [C]. New Orleans, LA, USA, 2007. 1837-1843.
- [11] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等 (Liu Wenhua, Song Qiang, Teng Letian, et al.). 基于链式逆变器的 50MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制 (Balancing control of DC voltage of 50MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2004, 24 (4): 145-150.
- [12] 胡应宏, 任佳佳, 王建曌 (Hu Yinghong, Ren Jiajia, Wang Jianze). 级联 STATCOM 阀组直流侧电压不平衡现象及原因分析 (Analysis of voltage unbalance phenomenon and causes in cluster DC link of cascaded H-bridge STATCOM) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (21): 96-100.
- [13] 黄海宏, 刘鑫, 薛欢, 等 (Huang Haihong, Liu Xin, Xue Huan, et al.). 基于载波移相技术的 H 桥级联高压 APF 研究 (Study of high voltage H-bridges cascaded APF based on carrier phaseshift technique) [J]. 电子测量与仪器学报 (Journal of Electronic Measurement and Instrument), 2012, 26 (8): 687-692.
- [14] 张茂松, 查晓明, 孙建军 (Zhang Maosong, Zha Xiaoming, Sun Jianjun). D-STATCOM 的无源性控制 (Passivity based control of cascade D-STATCOM) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (15): 33-39.
- [15] 戴珂, 徐晨, 丁玉峰 (Dai Ke, Xu Chen, Ding Yufeng). 载波轮换调制在级联 H 桥型 STATCOM 中的应用 (The applications of carrier rotation modulation on cascaded H-bridges STATCOM) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (10): 1-8.
- [16] 刘钊 (Liu Zhao). 风力发电系统中链式 STATCOM 关键技术 (Research on key techniques in cascade multi-level STATCOM for wind power generation) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2010.
- [17] 陈仲, 王志辉, 陈淼 (Chen Zhong, Wang Zhihui, Chen Miao). 一种高动态性能的级联型有源电力滤波器 (A cascade H-bridge active power filter with high dynamic performance) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (3): 147-154.
- [18] 刘桂英, 邓明锋, 栗时平, 等 (Liu Guiying, Deng Mingfeng, Li Shiping, et al.). H 桥级联 STATCOM 直流侧电压控制新方法 (Novel DC voltage control method of H bridge cascaded STATCOM) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2015, 27 (10): 50-53.
- [19] 赵波, 郭剑波, 周飞 (Zhao Bo, Guo Jianbo, Zhou Fei). 链式 STATCOM 相间直流电压平衡控制策略 (DC voltage balance control strategy among phases for cascaded STATCOM) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (34): 37-39.
- [20] 胡应宏, 任佳佳, 王建曌, 等 (Hu Yinghong, Ren Jiajia, Wang Jianze, et al.). 级联 SVG 直流侧电压平衡控制方法 (Balancing control method of DC voltage of cascade H-bridge SVG) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2010, 14 (11): 31-36.
- [21] 刘正富, 徐政, 刘为群 (Liu Zhengfu, Xu Zheng, Liu Weiqun). 基于改进载波移相 SPWM 的链式 STATCOM 的电容电压平衡控制策略 (Novel strategy of capacitor voltage balancing control for cascaded STATCOM based on advanced carrier phase shifting SPWM) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2012, 48 (12): 54-58.
- [22] 崔晓飞, 陆国俊, 薛军霞, 等 (Cui Xiaofei, Lu Guojun, Xue Junxia, et al.). 链式 STATCOM 直流电容电压均衡控制策略 (DC capacitor voltages balancing control strategy of cascade STATCOM) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2015, 27 (1): 92-97.

DC balance strategy for cascaded SAPF based on PD-SFO-PWM

WANG Yu-feng¹, DI Tian-tuo¹, GAO Zhi-cheng², YE Qing²

- (1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
- 2. Fuxin Power Supply Company of Liaoning Electric Power Co. , Ltd. , Fuxin 123000, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of the DC voltage imbalance for the cascade H-Bridge shunt active power filter(SAPF) ,in order to stabilize the DC voltage ,balance the DC voltage among phases and balance the DC voltage of each unit ,this paper presents a three-stage balance strategy of DC voltage based on phase disposition-switching frequency optimal-PWM (PD-SFO-PWM). When the DC voltage imbalance occurs ,the strategy plays the role of regulating. Compared with the traditional balance strategy ,because the modulation strategy has both the modulation function and the function of balancing the DC voltage of each unit ,it avoids to design the extra strategy of balancing the DC voltage of each unit , which greatly reduces the complexity of the balance strategy. Finally ,this paper conducted the simulation of seven-level SAPF and verified the feasibility of the balance strategy. In a short period of time ,the balance strategy can achieve a balance effect and ensure the stability of SAPF with a smaller overshoot.

Key words: cascade H bridge; SAPF; DC voltage imbalance; PD-SFO-PWM; three-stage balance strategy