

级联 H 桥型变流器直流电压均衡控制

吴丽然, 吴命利

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 在分析变流器直流电容充放电状态和功率器件开关状态之间关系的基础上, 提出了一种改进的适用于整流、无功补偿、谐波电流抑制等场合的级联 H 桥型变流器直流电压均衡控制方法。根据变流器交流侧能量传递方向合理地选择开关函数, 调整变流器各个直流电容充放电状态, 实现直流电压的均衡控制。调节均衡控制周期, 可以改变直流电压均衡速率, 调整均衡算法对开关频率的影响。基于 MATLAB/Simulink 的仿真结果表明了所提直流电压均衡控制方法的有效性。

关键词: 级联 H 桥型变流器; 直流电压均衡控制; 整流; 无功补偿; 谐波电流抑制

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.015

0 引言

级联型多电平变流器也被称为级联 H 桥型 CHB (Cascaded H-Bridge) 变流器、多单元串联型多电平变流器 MMCC (Multi-Module-Cascaded Converter), 由于多单元串联, 各单元结构相同, 且直流侧相互独立, 易采用模块化设计和安装, 能够实现高电压、多电平的输出, 成为高压大功率电力电子装置的主流拓扑结构, 广泛应用于静止同步补偿器、光伏并网逆变器、电力电子变压器等场合^[1-3]。

文献[4-5]指出开关损耗、器件断态损耗、电容自身损耗和吸收回路损耗的差异以及输入脉冲延时的不同会造成直流电压的不均衡, 而直流电压的均衡是变流器正常工作的基础。因此, 直流电压的均衡控制是级联型多电平变流器的研究热点^[6]。文献[7-8]采用增加额外均衡电路的方法调节等效并联损耗或直流母线能量实现了直流电压的均衡, 虽然没有增加控制方法的复杂程度, 但是增加了硬件电路的功率损耗。采用叠加电压矢量的方法, 文献[9-12]实现了 CHB 静止无功补偿器的直流电压均衡控制, 文献[13]实现了 CHB 整流器的直流电压均衡控制, 但每个 H 桥变流器都需要一个调节器, 结构复杂且参数整定困难。文献[14-15]采用直流电压排序后合理分配 H 桥变流器的开关状态实现了直流电压的均衡控制。但文献[14]在每个控制周期仅对一个 H 桥变流器开关状态进行调整, 在一定程度上限制了直流电压均衡能力的发挥; 文献[15]以正投入和负投入相同数量的 H 桥变流器保证电平数不变, 但牺牲了最大电平输出能力。

本文在上述文献研究的基础上, 通过分析变流器

直流电容充放电和变流器功率器件开关状态的关系, 提出了一种改进的基于脉冲再分配的 CHB 变流器直流电压均衡控制方法。与传统的直流电压多环均衡相比, 该方法不需要 PI 调节器, 因此省去了繁琐的 PI 参数整定过程, 且易于扩展, 适用于整流、无功补偿和谐波补偿等多种场合。最后通过仿真验证了该方法的有效性。

1 CHB 变流器数学模型

1.1 主电路拓扑结构

CHB 变流器主电路如图 1 所示, 由 n 级单相 H 桥变流器构成, 可看成多单元串联结构。图中, u_s 为电源电压; L 为交流侧等效电感; $C_1—C_n$ 为各单元直流侧支撑电容; $R_1—R_n$ 为直流侧等效负载电阻; n 为 CHB 变流器单元个数; $V_{Ti,j}$ ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4$) 为功率开关器件; i_o 为 CHB 变流器电流; a, b 表示 CHB 变流器交流侧接线端子。

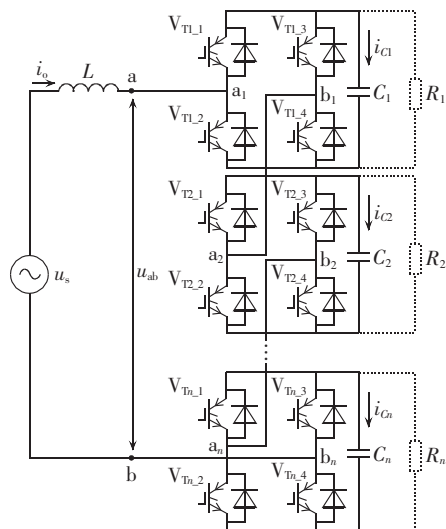


图 1 CHB 变流器主电路

Fig.1 Main circuit of CHB converter

假设交流侧等效电阻很小, 在此忽略不计。电源

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2017-06-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2015YJ-S157)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015YJS157)

电压 u_s 如式(1)所示,交流侧基尔霍夫电压方程如式(2)所示,CHB 变流器交流侧电压 u_{ab} 如式(3)所示。

$$u_s = E \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$L \frac{di_o}{dt} = u_s - u_{ab} \quad (2)$$

$$u_{ab} = \sum_{k=1}^n u_{dck} = \sum_{k=1}^n S_k U_{dck} \quad (3)$$

其中, E 为电源电压幅值; U_{dck} 为第 k 个 H 桥变流器直流电压; S_k 为第 k 个 H 桥变流器的开关函数。

$$S_k = \begin{cases} 1 & u_{abk} = U_{dck} \\ 0 & u_{abk} = 0 \\ -1 & u_{abk} = -U_{dck} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 直流电容充放电分析

每个 H 桥变流器的直流电容充放电状态与其交流侧功率相关。各 H 桥变流器的交流侧电流相同,而电压不同。以第 k 个 H 桥变流器为例,当交流侧电压 u_{abk} 和电流 i_o 方向相同时,直流电容吸收功率,直流电压增大;反之,直流电容释放功率,直流电压减小。如图 2 所示,当 $u_{abk} i_o > 0$ 时,直流电容从交流电源吸收能量,如图中左斜线阴影区域;当 $u_{abk} i_o < 0$ 时,直流电容向交流电源释放能量,如图中右斜线阴影区域。

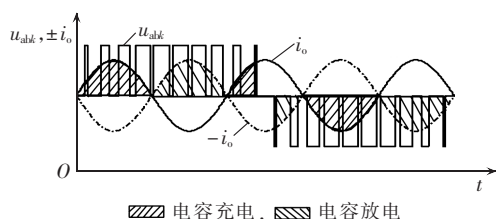


图 2 交流侧电压、电流与电容充放电关系

Fig.2 Relationship among AC voltage, current and capacitor's charge/discharge

由式(3)可知,每个 H 桥变流器交流侧电压的正负由开关函数确定。因此,电流流向确定时,不同开关函数对应不同的能量流动方向。仍以第 k 个 H 桥变流器为例,分析不同开关函数时能量流动方向,结果如图 3 所示。其中,定义变流器电流 i_o 从电源流向变流器为正。进一步分析可以得到如下结论。

当 $S_k = 0$ 时, $u_{abk} = 0$, 电容 C_k 处于旁路状态,不与交流侧进行能量交换。

当 $i_o < 0$ 时,若 $S_k = 1$, 则 V_{Tk1}, V_{Tk4} 导通, $u_{abk} > 0$, $u_{abk} i_o < 0$, 电容 C_k 处于放电状态,向交流侧释放能量,直流电压逐渐降低;若 $S_k = -1$, 则 V_{Tk2}, V_{Tk3} 导通, $u_{abk} < 0$, $u_{abk} i_o > 0$, 电容 C_k 处于充电状态,从交流侧吸收能量,直流电压逐渐升高。

同理,当 $i_o > 0$ 时,若 $S_k = 1$, 则 V_{Tk1}, V_{Tk4} 导通, $u_{abk} > 0$, $u_{abk} i_o > 0$, 电容 C_k 处于充电状态,从交流侧吸收能量,直流电压逐渐升高;若 $S_k = -1$, 则 V_{Tk2}, V_{Tk3} 导通, $u_{abk} < 0$, $u_{abk} i_o < 0$, 电容 C_k 处于放电状态,向交流侧

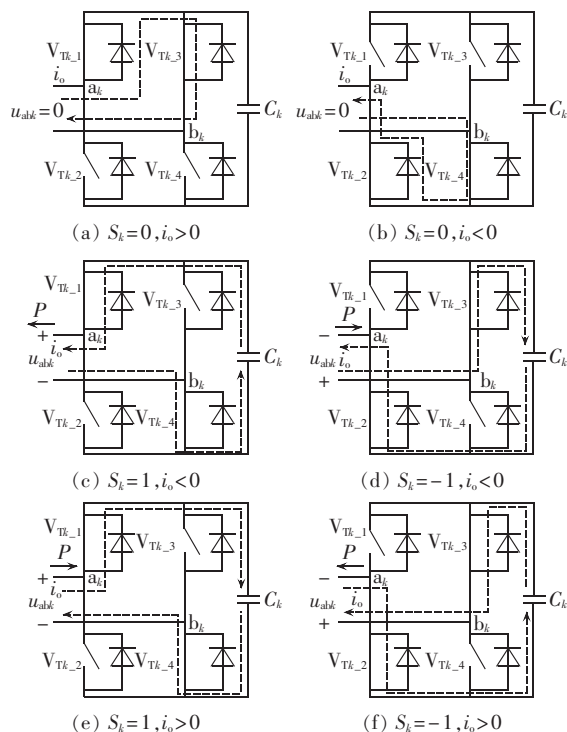


图 3 不同开关状态时的能量流动

Fig.3 Power flow with different switching states

释放能量,直流电压逐渐降低。

2 直流电压均衡控制策略

2.1 CHB 变流器控制系统结构

CHB 变流器的控制系统如图 4 所示。图中, i_L 为负载电流; i_q^*, i_h^* 分别为无功电流参考值和谐波电流参考值; U_{dc}^* 为直流电压参考值; I_d^*, i_d^* 分别为给定的有功电流幅值和瞬时值; e_u, e_i 分别为电压、电流控制器的输入。整体直流电压外环采用传统的 PI 控制,将各 H 桥变流器直流电压求平均值,经过低通滤波器(或陷波滤波器等)得到其直流成分,与参考电压做差,经 PI 调节器生成维持直流电压稳定所需要的基波有功电流。该基波有功电流再与单位同步正弦量相乘,得到基波有功电流瞬时参考值。电流跟踪常采用 PI/P 或 PR 控制,本文以 PI 调节器为例。在

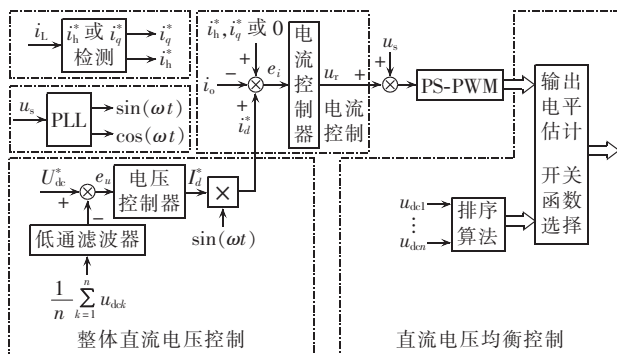


图 4 CHB 变流器控制系统原理图

Fig.4 Principle diagram of CHB converter control system

整流条件下,将采集到的 CHB 电流与基波电流参考值做差,经 PI 调节器生成参考电压;在无功补偿和谐波补偿条件下,通过检测单元得到负载的无功电流和谐波电流,将基波电流参考值和负载无功电流或谐波电流相加作为电流参考值,再经 PI 调节器生成参考电压。最后经过电源电压前馈控制、载波移相脉宽调制(PS-PWM)等单元生成初始驱动脉冲,再通过直流电压均衡控制方法对初始驱动脉冲进行交换,即开关函数的合理选择,形成调整后的驱动脉冲。

2.2 电压均衡控制

CHB 变流器直流电压均衡控制主要有直流电压排序、输出电平估计和开关状态(或开关函数)选择 3 个步骤。

(1) 直流电压排序。

CHB 变流器共有 n 个直流电压,经 AD 变换后存入数组 $U_{dc}[n]$ 。对数组 $U_{dc}[n]$ 按大小排序。本文仿真模型以冒泡法从小到大排序为例^[16],得到第 1— n 个 H 桥变流器直流电压对应的排序序号,存入数组 $T[n]$ 。在实际应用中,可以使用快速排序、堆排序、归并排序等时间复杂度较小的算法,以便减小时间消耗,使得该电压均衡控制算法可以扩展应用于大规模级联变流系统。此外,对大规模变流系统而言,部分算法,如直流电压均衡控制算法,可以在 FPGA 等芯片中并行运行,大幅提高计算速度。

(2) 输出电平估计。

为了保证 CHB 变流器输出电平不变,需要对其进行估计。估计方法有很多,仅举例如下。

方法 1:根据式(3)可知,可根据当前各初始开关函数计算 CHB 变流器交流侧输出电平数 N ,计算方法如式(5)所示。

$$N = \sum_{k=1}^n S_k \quad (5)$$

方法 2:可由归一化的调制波 u_{ref} 近似得到 CHB 变流器交流侧输出电平数 N ,如式(6)所示。

$$N = \text{ROUND}(nu_{ref}) \quad N < n \quad (6)$$

其中,ROUND()为四舍五入取整函数。根据调制原理可知,该方法得到的当前近似电平数最多有 1 个电平的误差。

方法 3:根据式(3)可知,CHB 变流器交流侧输出电平数 N 可由交流侧电压 u_{ab} 和各 H 桥变流器直流电压得到。各直流电压在其参考值 u_{dcref} 附近波动,可近似以参考值代替,因此可近似得到:

$$N = \text{ROUND}\left(\frac{u_{ab}}{U_{dc}^*}\right) \quad (7)$$

由于交流侧电压 u_{ab} 一般未知,因此可通过式(7)得到其近似值。然后,根据式(6)得到 CHB 变流器交流侧输出电平数 N 。

$$u_{ab}(k) = \hat{u}_{ab}(k) = u_s(k) - \frac{L}{T_s} [i_o^*(k) - i_o(k)] \quad (8)$$

其中, T_s 为等效开关周期; $i_o^*(k)$ 为 $k-1$ 时刻预测得到的 k 时刻电流参考值。

(3) 开关函数选择。

根据上述分析结果,在保证输出电平数保持不变的情况下,合理地选择各 H 桥变流器的开关函数。当电容处于充电状态时,应优先选择直流电压较低的 $|N|$ 个变流器开通,其他 $n-|N|$ 个变流器电容处于断路状态;当电容处于放电状态时,应优先选择直流电压较高的 $|N|$ 个变流器开通,其他 $n-|N|$ 个变流器电容处于断路状态。

根据直流电压排序结果和当前电容充放电状态,通过调整各 H 桥变流器的开关状态得到直流电压的均衡控制,同时保证了输出电平不变。其中,开关状态选择流程如图 5、6 所示,可以总结开关状态选择原则如下。

a. 当 $N > 0$ 、 $i_o < 0$ 时,电容处于放电状态,应使得电压较高的 N 个 H 桥变流器开关函数 $S_k = 1$,以此来降低直流电压;电压较低的 $n-N$ 个 H 桥变流器开关函数 $S_k = 0$ ($V_{Tk,1}$ 、 $V_{Tk,3}$ 导通)。

b. 当 $N < 0$ 、 $i_o > 0$ 时,电容处于放电状态,应使得电压较高的 $|N|$ 个单元的开关函数 $S_k = -1$,以此来降低直流电压;电压较低的 $n-|N|$ 个 H 桥变流器开关函数 $S_k = 0$ ($V_{Tk,2}$ 、 $V_{Tk,4}$ 导通)。

c. 当 $N > 0$ 、 $i_o > 0$ 时,电容处于充电状态,应使得

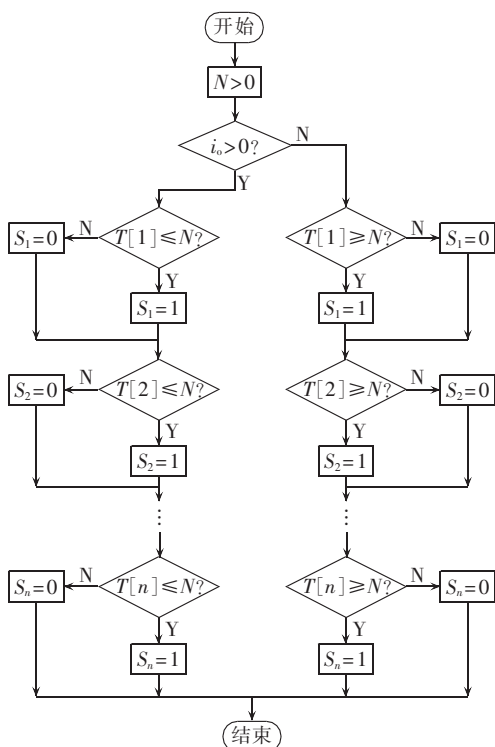
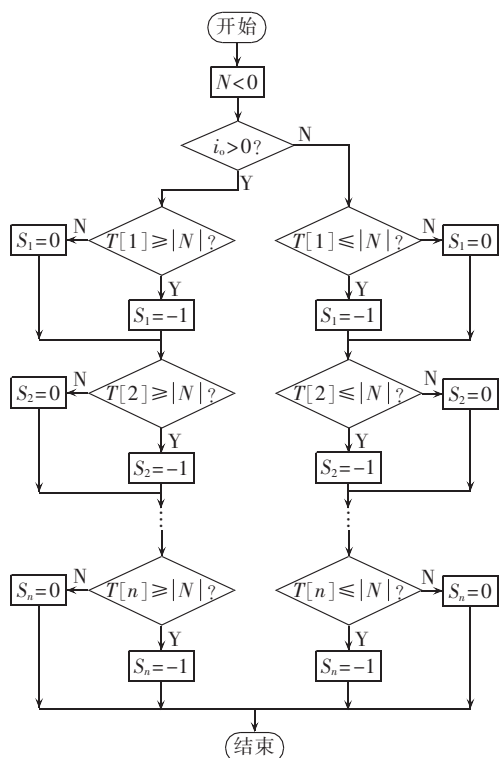


图 5 $N > 0$ 时开关函数选择

Fig.5 Selection of switching functions when $N > 0$

图 6 $N < 0$ 时开关函数选择Fig.6 Selection of switching functions when $N < 0$

电压较低的 N 个单元的开关函数 $S_k = 1$, 以此来升高直流电压; 电压较高的 $n - N$ 个 H 桥变流器开关函数 $S_k = 0$ ($V_{Tk,1}, V_{Tk,3}$ 导通)。

d. 当 $N < 0, i_o < 0$ 时, 电容处于充电状态, 应使得电压较低单元的 $|N|$ 个单元的开关函数 $S_k = -1$, 以此来升高直流电压; 电压较高的 $n - |N|$ 个 H 桥变流器开关函数 $S_k = 0$ ($V_{Tk,2}, V_{Tk,4}$ 导通)。

该直流电压均衡控制方法可同时对多个电压偏差较大的 H 桥变流器进行脉冲调节, 同时可以保证最大输出电平数和当前输出电平数不变。在合理的死区设置下, 能够避免桥臂直通现象。该方法适用性较强, 可适用于整流、无功补偿和谐波补偿等多种场合。

2.3 均衡控制周期的影响

响应速度是直流电压均衡控制的重要指标之一。该直流电压均衡控制算法的计算周期(以下称为均衡控制周期 T_{bal})直接影响响应速度。根据上述原理可知, 均衡控制周期越短, 响应速度越快, 控制精度越高。一般将均衡控制周期设为变流器等效开关周期的整数倍。

均衡控制周期除了对均衡速度有影响外, 还对开关频率有影响。若均衡控制周期为变流器等效控制周期的整数倍, 即最小为 1 个控制周期, 则该算法根据当前充放电状态和直流电压排序结果, 仅对当前时刻的各功率单元的开关函数(或驱动脉冲)进行

重新分配, 在 PWM 中断时输出。因此, 该算法仅是在每个或每隔几个控制周期调整一次单个变流器输出状态, 不会增加额外的开关动作, 也不会改变整个系统的等效开关频率。

对单个 H 桥变流器而言, 其开关频率不再是恒定的, 且最大为等效均衡控制频率, 图 7(a)和(b)分别为加入均衡控制前、后的输出电压(均衡控制频率为等效控制频率)。当均衡控制频繁动作时, 单个 H 桥变流器会出现开关频率过高或大量窄脉冲, 其开关频率即为等效控制频率, 该窄脉冲即为等效开关频率下的输出电平, 因此需按工作频率为等效控制频率的原则选择合适的功率开关器件。

为了缓解单个 H 桥变流器开关频率过高的问题, 均衡控制频率可选定为单个 H 桥变流器控制频率。过小的窄脉冲反映的是过大的电压变化率 du/dt , 因此再配合一定的吸收电路, 可以有效降低开关频率、减少窄脉冲, 如图 7(c)和(d)所示。均衡控制表现为单个窄脉冲或长脉冲(连续多次电压均衡作用)对输出电平的调节, 且窄脉冲持续时间一般为 $1 \mu s$ 左右。一般功率开关器件的开通和关断时间为微秒级别, 因此, 合理地选择功率开关器件和吸收电路的参数, 可以进一步减少窄脉冲, 同时保留长脉冲调节电平状态, 达到电压均衡的目的。

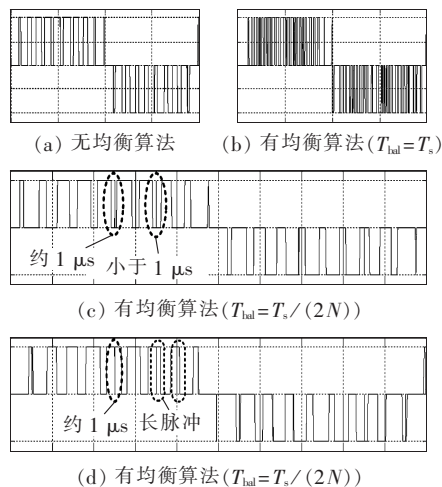


图 7 不同均衡控制周期时 H 桥变流器输出电压

Fig.7 Output voltages of H-bridge converter with different T_{bal} values

在该算法中, 单模块单元等效开关频率与直流电压均衡性能是一对矛盾关系, 均衡速度越快, 均衡算法对单模块单元等效开关频率影响越大。因此, 在具体应用环境下需要根据实际需要二者折中考虑。此外, 进一步优化电压均衡控制算法也是一种合理的方法, 根据电路工作原理和当前状态预测是否将要出现窄脉冲, 若是则在电压均衡算法中调整输出状态即可避免出现窄脉冲。

3 仿真验证

为了验证上述 CHB 变流器直流电压均衡控制方法的有效性,基于 MATLAB/Simulink 进行仿真研究。根据需求,每级功率单元额定输入电压设计为 100 V,构建 12 级($n=12$)CHB 变流器仿真模型,电源电压设计为 1200 V(电源电压为电网电压经调压器变换后的可调电压),直流电压均衡控制在 m 文件中实现。主要的仿真参数如下:电源频率 $f=50$ Hz,进线电感 $L=26$ mH,直流侧电容 $C=4700$ μ F,直流电压给定值 $U_{\text{dcref}}=180$ V,单级载波频率 $f_c=500$ Hz。分别研究整流、无功补偿和谐波补偿时的直流电压均衡效果,补偿前后直流电压对比如表 1 所示。

表 1 直流电压均衡前后直流电压对比
Table 1 Comparison of DC voltages with and without DC voltage balance

单元 编号	U_{dc}/V (整流)		U_{dc}/V (无功补偿)		U_{dc}/V (谐波补偿)	
	均压前	均压后	均压前	均压后	均压前	均压后
1	183.4	180.0	180.1	179.7	180.5	180.2
2	182.9	180.0	178.6	179.7	178.6	180.2
3	183.2	180.0	176.1	179.7	176.4	180.2
4	183.3	180.0	174.0	179.7	176.2	180.4
5	178.6	179.9	181.4	179.6	182.7	180.2
6	178.4	179.9	181.0	179.7	182.7	180.2
7	178.1	179.9	181.9	179.7	183.2	180.2
8	178.2	179.9	181.7	179.6	181.7	180.2
9	178.8	179.9	182.8	179.6	182.3	180.2
10	177.8	179.9	180.6	179.7	181.7	180.2
11	177.9	179.9	181.4	179.6	182.5	180.2
12	178.8	179.9	181.1	179.7	181.5	180.2

3.1 整流时直流电压均衡控制

假设第 1—4 个 H 桥变流器负载电阻 $R_1—R_4$ 为 110 Ω ,其他为 100 Ω 。在 0.2 s 加入直流电压均衡控制,在 0.3 s 时增加负载。整流时直流电压均衡效果如图 8 所示,可见直流电压在很短的时间内达到均衡,且负载变化时直流电压均衡的动态性能良好。

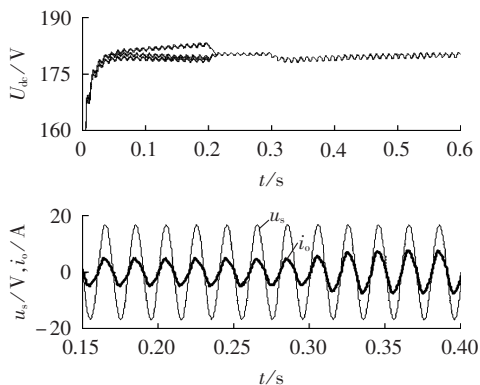


图 8 整流时直流电压均衡效果

Fig.8 Effect of DC voltage balance during rectifying

3.2 无功补偿时直流电压均衡控制

假设由电容参数差异造成直流电压不均衡,可令 $C_1—C_3$ 为 1.05 C 、 $C_4—C_6$ 为 1.1 C 、 $C_7—C_9$ 为 1.15 C 、

$C_{10}—C_{12}$ 为 1.2 C 。在 0.2 s 时加入直流电压均衡控制,在 0.3 s 时负载突变,由容性无功电流突变为感性无功电流。无功补偿时直流电压均衡效果如图 9 所示,可见直流电压在很短的时间内达到均衡,在负载突变的暂态过程中直流电压均衡性能仍然良好。

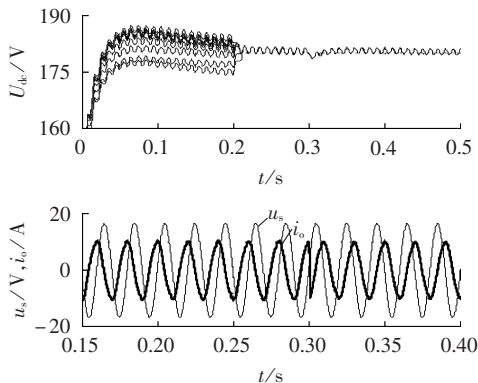


图 9 无功补偿时直流电压均衡效果

Fig.9 Effect of DC voltage balance during reactive power compensation

3.3 谐波补偿时直流电压均衡控制

同 3.2 节假设由电容参数差异造成直流电压不均衡,以单相二极管整流电路为非线性负载。在 0.2 s 时加入直流电压均衡控制,在 0.3 s 时 CHB 变流器由谐波补偿模式突变为谐波和无功同时补偿模式。谐波补偿时直流电压均衡效果如图 10 所示,可见直流电压在很短的时间内达到均衡,在谐波补偿和谐波、无功同时补偿时都有良好的稳态均衡性能,且在补偿模式变换时也具有好的动态均衡性能。

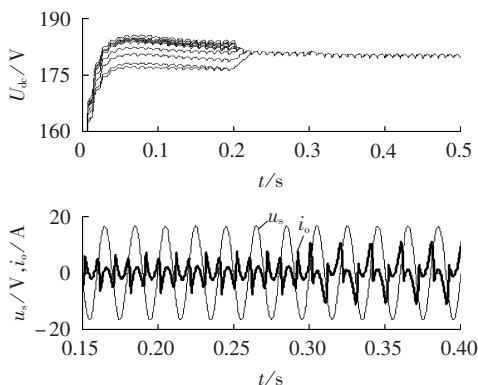


图 10 谐波补偿时直流电压均衡效果

Fig.10 Effect of DC voltage balance during harmonic compensation

3.4 均衡控制周期对响应速度的影响

直流电压均衡速度与均衡控制周期 T_{bal} 有关,以无功补偿为例,分别以每 2、4、8 个等效开关周期 T_s 进行一次直流电压均衡控制使能,每次使能有效时连续进行若干次(仿真以 2 次为例)均衡控制,结果如图 11 所示。图 12 为直流电压均衡控制使能信号,高电平有效。图 11、12 中,从上至下分别对应 $T_{\text{bal}}=2T_s、4T_s、8T_s$ 的结果。

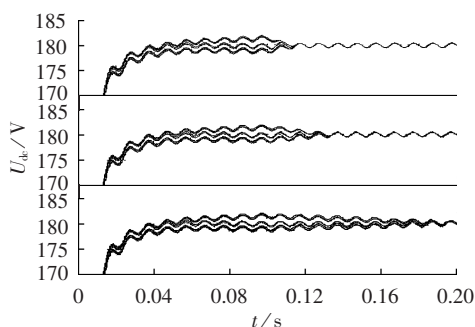


图 11 不同均衡控制周期时直流电压均衡效果比较

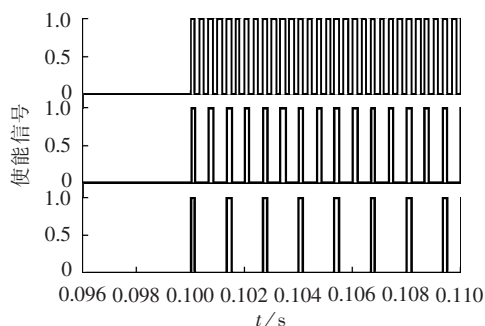
Fig.11 Comparison of DC voltage balance effects among different T_{bal} values

图 12 不同均衡控制周期时的使能信号

Fig.12 Enable signals with different T_{bal} values

由图 11、12 可见,增大均衡控制周期可以降低软件压力,但直流电压均衡速度降低,甚至无法满足均衡要求。因此,选定均衡控制周期时,需要在均衡速度和软件计算量之间折中考虑。

4 结论

通过分析 CHB 变流器直流电容充放电和开关函数的关系,提出一种改进的 CHB 变流器直流电压均衡控制方法。通过直流电压排序结果和直流电容充放电状态,合理选择开关函数,达到了直流电压均衡的目的,适用于整流、无功补偿和谐波补偿等各种场合。分析了均衡周期对均衡速度的影响,指出将均衡控制周期设定为单个 H 桥变流器控制周期,可以有效减小均衡算法对单个 H 桥变流器开关频率的影响。

参考文献:

[1] 杨昆,陈磊,陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):36-41.
YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalanced load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 36-41.

[2] ZHAO T, WANG G, BHATTACHARYA S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.

[3] 丁明,陈中,张国荣,等. 级联 H 桥储能变换器直流纹波电流的无源与有源抑制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):19-24.

DING Ming, CHEN Zhong, ZHANG Guorong, et al. Cascaded H-bridge SVG control based on feedback linearization control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 19-24.

[4] 耿俊成,刘文华,袁志昌. 链式 STATCOM 直流电压不平衡现象研究(一)仿真和试验[J]. 电力系统自动化,2003,27(16):53-57.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascade STATCOM part one simulations and experiments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 53-57.

[5] 耿俊成,刘文华,袁志昌. 链式 STATCOM 直流电压不平衡现象研究(二)数学模型[J]. 电力系统自动化,2003,27(17):35-39.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascade STATCOM part two mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 35-39.

[6] 徐榕,于泳,杨荣峰,等. H 桥级联 STATCOM 直流侧电容电压平衡控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):15-22.
XU Rong, YU Yong, YANG Rongfeng, et al. DC capacitor voltage balance control of H-bridge cascaded STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 15-22.

[7] 臧春艳,裴振江,何俊佳,等. 链式 STATCOM 直流侧直流电压控制策略研究[J]. 高压电器,2010,46(1):17-21.
ZANG Chunyan, PEI Zhenjiang, HE Junjia, et al. Research on DC link capacitor voltage control strategies of the cascaded STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 17-21.

[8] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于链式逆变器的 50 MV·A 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):145-150.
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. Balancing control of DC voltages of 50 MV·A STATCOM based on multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150.

[9] 刘钊,刘邦银,段善旭,等. 链式静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(30):7-12.
LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade multilevel STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12.

[10] 孙毅超,赵剑锋,季振东. 并网型级联 H 桥变换器直流电压平衡和功率均衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):55-60.
SUN Yichao, ZHAO Jianfeng, JI Zhendong. Control strategy of DC voltage balance and power equilibrium for grid-connected cascaded H-bridge converters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 55-60.

[11] YANG Xingwu, JIANG Jianguo, LIU Shichao. A novel design approach of DC voltage balancing controller for cascaded H-bridge converter-based STATCOM[C]//IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. Wuhan, China: IEEE, 2009: 2359-2364.

[12] ZYGMANOWSKI M, GRZESIK B, MICHALAK J. Power conditioning system with cascaded H-bridge multilevel converter DC-link voltage balancing method[C]//Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, England: IEEE, 2011: 1-10.

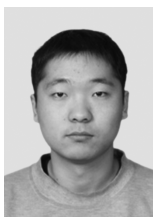
[13] BARRENA J A, MARROYO L, RODRIGUEZ M A, et al. Comparison of DC-bus voltage balancing strategies for three-phase DSTATCOM based on cascaded H-bridge multilevel converter[C]//Proceedings of IEEE Conference on Power Electronics. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 4819-4824.

[14] 熊桥坡,罗安,帅智康,等. 级联型 SVG 单载波调制策略研究

- [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 74-81.
- XIONG Qiaopo, LUO An, SHUAI Zhikang, et al. A single-carrier modulation strategy for cascade SVG[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 74-81.
- [15] 林志勇, 江道灼, 周月宾, 等. 基于级联 H 桥换流器的 APF-STATCOM 的控制与调制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 91-96.
- LIN Zhiyong, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. Control and modulation for APF-STATCOM based on cascaded H-bridge converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 91-96.
- [16] 喻锋, 王西田. 基于冒泡原理的模块化多电平换流器快速电压均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 81-86.
- YU Feng, WANG Xitian. Fast voltage balancing control based

on bubbling principle formodular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 81-86.

作者简介:



吴丽然

吴丽然(1987—),男,河北石家庄人,博士研究生,研究方向为牵引变流器控制、高压大功率变流器拓扑结构及控制、电气化铁道电能质量治理(E-mail:cggd2012@bjtu.edu.cn);

吴命利(1971—),男,河北藁城人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电气化铁道及城市轨道交通供电、电磁暂态计算与电力系统数字仿真等(E-mail:mlwu@bjtu.edu.cn)。

DC voltage balancing control for cascaded H-bridge converter

WU Liran, WU Mingli

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on analyzing the relationship between the charging/discharging states of DC capacitors and the switching states of the power devices, an improved DC voltage balancing control method is proposed for cascaded H-bridge converter, which can be applied in various situations such as rectifier, reactive power compensation, harmonic current elimination, etc. According to the power flow direction at AC side of converter, the DC voltage balance is achieved by selecting the switching functions and adjusting the charging/discharging states of DC capacitors. By changing the balancing control cycle, the DC voltage balancing rate and the influence of balance algorithm on switching frequency can be both adjusted. Simulative results based on MATLAB/Simulink show the effectiveness of the proposed DC voltage balancing control method.

Key words: cascaded H-bridge converter; DC voltage balancing control; rectify; reactive power compensation; harmonic current elimination

(上接第 99 页 continued from page 99)

Power transmission capability analysis of DC island transmission system

ZHOU Yuzhi, XU Zheng, DONG Huanfeng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The sending-end system of the traditional HVDC transmission system may operate in islanding mode and the power transmission capability of DC island transmission system is important in its operation, so that the power transmission capability is deeply studied. The model of DC island transmission system is built with PSCAD/EMTDC simulation program and the MPCs(Maximum Power Curves) of the system are drawn by theoretical calculation and time-domain simulation. According to the different change rates of DC current reference, the influences of excitation models and parameters on the power transmission capability in low current change rate, and the influences of excitation parameters on the system transient process in high current change rate are discussed respectively. The proposed method is applied to analyze the faults in the sending-end system, then the mechanism of instability is expounded and some improvement measures are put forward. Simulative results show that DC current amplitude limiting and generator excitation forcing based on power transmission capability analysis can significantly improve the transient response characteristics of DC island transmission system with faults.

Key words: DC island; transmission capability; maximum power curve; short circuit ratio; excitation system; improvement measures; time-domain simulation; models