文章编号：2096-5125 (2018) 01-0065-08 中图分类号：TM 721.1 文献标志码：A

模块化多电平换流器预充电时子模块均压效果劣化机理研究

李超，方日升，唐志军，郭晓君，晁武杰，石吉银，郭健生
（国网福建省电力有限公司电力科学研究院，福建省 福州市 350007）

Mechanism Study on Voltage Balance Effect Deterioration of Modular Multilevel Converter at Pre-Charging State

LI Chao, FANG Ri-sheng, TANG Zhi-jun, GUO Xiao-jun, CHAO Wu-jie, SHI Ji-yin, GUO Jian-sheng
(State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian Province, China)

Abstract: The voltage balance effect was degraded in the pre-charging process of modular multilevel converter. The capacitor voltage was dropped and energy-absorbing source was repeatedly reset of some sub-modules. In order to investigate the mechanism of voltage balance effect deterioration, the dynamic variation of equivalent resistance of energy-absorbing source was analyzed and the designed simulation model of the sub-module would much closely approach to the fact. What's more, the voltage change of the sub-module in the pre-charging process was also studied based on the optimized model. The simulation results show that the degradation of voltage balance effect are mainly attributed to the redistribution of the sub-module voltage that caused by the parameters inconsistency of the energy-absorbing source. And the voltage polarization would be further aggravated via the formed positive feedback between equivalent resistance and the capacitor voltage. The research results can provide basis for adjusting the operating parameters of the HVDC flexible project and optimizing the design of the converter.

Key words: modular multilevel converter; HVDC flexible; energy-absorbing source; voltage balance; sub-module; pre-charging

摘 要：模块化多电平换流器在预充电过程中存在子模块均压效果劣化现象，部分子模块电压跌落甚至反复启停。针对这一问题，分析了取能电源等效阻抗动态变化情况并将其引入子模块仿真模型中，使模型更接近实际；根据改进后模型，分析了预充电时子模块电压变化过程。仿真结果表明，由于取能电源参数不一致性，导致子模块电压再分配，取能电源等效阻抗与电容电压形成正反馈，进一步加剧电压两极分化，最终导致均压效果劣化。研究结果可为柔性直流输电工程运行参数调整和换流器优化设计提供理论依据。

关键词：模块化多电平换流器；柔性直流输电；取能电源；均压；子模块；预充电

0 引言

目前中国已投运的五项柔性直流输电工程（分别位于南汇、南澳、舟山、厦门、鲁西）的换流器均采用模块化多电平拓扑，各相桥臂通过具有相同结构的多个子模块串联构成，换流器输出电压就是由工作的多个子模块电压级联形成[1-9]。各子模块电压波动应限制在允许范围内，当模块过压或欠压时，易造成子模块过压保护动作、IGBT因承受过电压而击穿、取能电源因欠压保护动作使控制板卡失电等故障，进而使子模块旁路。因此，子模块均压是模块化多电平换流器重点研究内容之一。

现有相关研究集中在电容值选取、控制方式优化、环流控制等方面来降低子模块电压波动。文献[10]提出了可降低子模块电容值和电压波动的控制方法；文献[11]提出子模块均压算法；文献[12]~[15]通过优化环流控制算法降低电压波动。但以上研究均基于换流器处于解锁状态时，而对于换流器闭锁预充电状态下的均压研究较少。换流器处于预充电状态时，相关研究简单地认为均压电阻和电容的存在使各子模块电压

基金项目：国家电网公司科技项目（52130416001Z）。
Project Supported by Science and Technology Foundation of SGCC (52130416001Z).

基本一致[16-17]，但根据厦门、南汇等柔直工程的实际数据知子模块均压效果发生劣化，部分子模块电压跌落甚至反复启停。文献[16]~[19]在建模时均只考虑了均压电阻和电容，而忽略了取能电源等效阻抗对均压效果的影响，根据以上模型无法分析均压效果劣化的机理。

依托厦门±320 kV柔直工程实例，本文改进了子模块仿真模型，引入取能电源等效阻抗参数，使其更符合工程实际。根据改进后模型分析了换流器预充电时子模块工作原理，解释了因取能电源不一致性引起子模块均压效果劣化的机理。分析结果对子模块均压电阻阻值、取能电源特性、换流器直流充电耐受时间等参数设计起指导作用，为模块化多电平换流器优化设计和运行参数调整提供理论依据。

1 换流器预充电时子模块等效模型

1.1 换流器预充电过程

厦门±320 kV柔直工程在世界上首次采用真双极接线[20-21]，其主电路拓扑图如图1所示。工程新建2座换流站，每站分为极Ⅰ、极Ⅱ2个阀厅，阀厅由6个桥臂构成，桥臂采用N个独立子模块（包括冗余模块）串联的方式，子模块采用半桥电路结构（图1右侧）。

在HVDC运行方式下，以换流站Ⅰ向换流站Ⅱ送电为例，换流器预充电步骤如下：

（1）换流站Ⅰ采用功率控制运行方式，合断路器1、2。此时各换流器处于闭锁状态，换流站Ⅰ进行不控整流充电，系统稳定后直流母线电压为：

$$U_{\mathrm{dc}}=\sqrt{2}U_{\mathrm{l}} \tag{1}$$

式中，U_{dc}为直流母线电压；U_{l}为阀侧交流线电压有效值。

现有子模块仿真模型认为均压电阻和电容值差异较小，其参数基本一致，各子模块电压均匀分布[16-17]。此时换流站Ⅰ由一个桥臂的子模块均压；换流站Ⅱ由于未合断路器，由每相上下桥臂的所有子模块均压。每个模块电压为：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{N}=\dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{l}}}{N}\\ U_{\mathrm{sm2}}=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2N}=\dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{l}}}{2N}\end{cases} \tag{2}$$

式中，U_{sm1}为换流站Ⅰ子模块电压；U_{sm2}为换流站Ⅱ子模块电压；N为每个桥臂的子模块数量。

（2）换流站Ⅱ采用电压控制运行方式，合断路器3、4。此时各换流器处于闭锁状态，换流站Ⅱ进行不控整流充电。系统稳定后直流母线电压与公式（1）一致，换流站Ⅰ、Ⅱ均由一个桥臂的子模块均压，每个模块电压为：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{N}=\dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{l}}}{N}\\ U_{\mathrm{sm2}}=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{N}=\dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{l}}}{N}\end{cases} \tag{3}$$

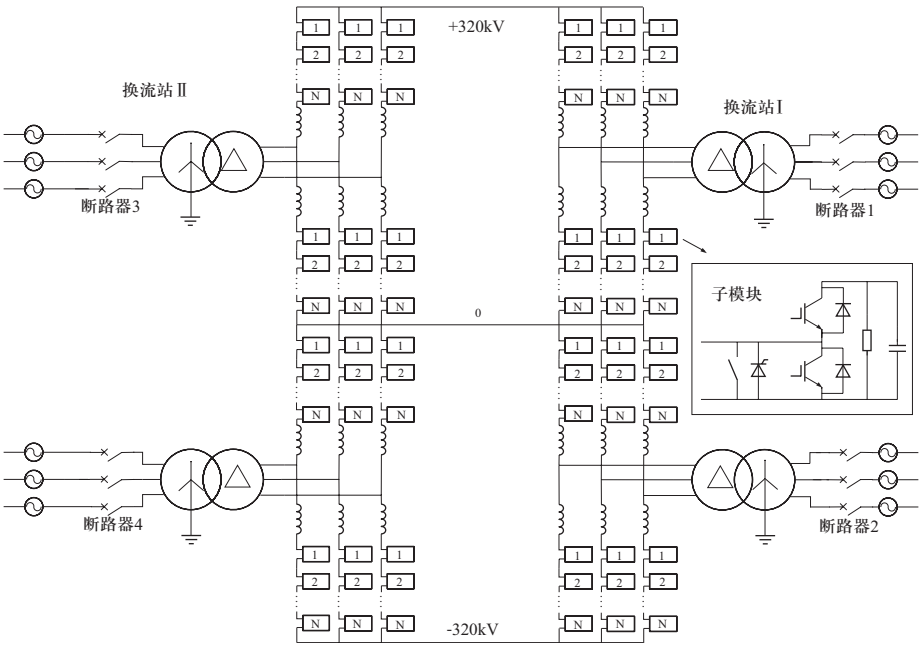


图 1 厦门±320kV柔性直流输电工程主电路拓扑图

Fig. 1 Circuit of Xiamen HVDC flexible transmission project

（3）换流站Ⅱ换流器解锁。系统稳定后直流母线电压达到额定值，其计算公式为：

$$U_{\mathrm{dcN}}=\frac{2\sqrt{2}}{M}U_{\mathrm{p}} \tag{4}$$

式中，U_{dcN}为解锁后直流母线电压额定值；U_{p}为交流出口相电压有效值；M为电压调制比。

换流站Ⅱ的换流器由于已解锁，每个时刻每相有n个模块投入工作。而换流站Ⅰ每个桥臂电压被直流电压和交流相电压所箝位，其电压随着直流母线电压的提升而增大，当直流母线电压达到额定值时，桥臂电压U_{sum1}（即桥臂上各子模块电压和）为[16]：

$$U_{\mathrm{sum1}}=\frac{U_{\mathrm{dcN}}}{2}+\sqrt{2}U_{\mathrm{p}} \tag{5}$$

每个模块电压为：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}=\dfrac{U_{\mathrm{sum1}}}{N}=\dfrac{2\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}}{2MN}+\dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}}{N}\\ U_{\mathrm{sm2}}=\dfrac{U_{\mathrm{dcN}}}{n}=\dfrac{2\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}}{Mn}\end{cases} \tag{6}$$

（4）换流站Ⅰ换流器解锁。系统稳定后直流母线电压仍为额定值。换流站Ⅰ、Ⅱ换流器均已解锁，每个时刻每相有n个模块投入工作，每个模块电压为：

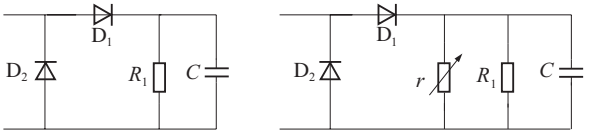
$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}=\dfrac{U_{\mathrm{dcN}}}{n}=\dfrac{2\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}}{Mn}\\ U_{\mathrm{sm2}}=\dfrac{U_{\mathrm{dcN}}}{n}=\dfrac{2\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}}{Mn}\end{cases} \tag{7}$$

至此，换流器预充电过程结束，进入正常运行状态。

在柔性直流输电工程实际运行时，由于调令下达、运行人员操作和断路器、旁路开关的状态核对等工作时间的限制，预充电各步骤保持时间在5~60 min范围内波动，因此子模块电压在预充电各步骤中基本可达到稳定状态。

1.2　子模块仿真模型改进方法

预充电过程中，现有子模块仿真模型如图2（a）所示[16-17]。由于IGBT处于闭锁状态，模型中器件只包括二极管、均压电阻和电容。实际工程中均压电阻阻值精度可达到0.5%，现有研究在预充电仿真时将均压电阻设置为同一参数，仿真计算得到的子模块电压一致[16-17]。而根据工程实际运行情况来看，各子模块电压在预充电过程中均压效果较差，这是由于现有模型忽略了取能电源对均压效果的影响。取能电源直接并联在电容两端，通过两级开关电源将电容电压转化为15 V、400 V，供控制板、驱动板及旁路开关使用。由于取能电源、均压电阻、电容并联，取能电源等效阻抗直接影响电压值。



(a)现有子模块仿真模型　　(b)改进后子模块仿真模型

图 2　预充电时子模块等效模型

Fig. 2　Equivalent circuit of SM at pre-charging state

本文提出子模块在预充电时的仿真模型改进方法，引入取能电源等效阻抗参数。改进后模型如图2（b）所示，图中电阻r为取能电源等效阻抗，R_1为均压电阻（kΩ级别）。取能电源等效阻抗与均压电阻并联后的电阻值决定子模块电容电压，但取能电源等效阻抗是变量，导致子模块电容电压发生动态变化。以取能电源两端电压（即电容电压）从零升至额定电压再降至零的过程为例，分析取能电源等效阻抗的变化如下：

（1）取能电源电压从零升至启动电压。在此阶段取能电源处于关断状态，其等效阻抗为MΩ级别，远大于均压电阻阻值。与均压电阻并联后阻值为：

$$R_{\mathrm{sm}}=\frac{rR_1}{r+R_1}\approx R_1\ \ (0<U<U_1,U\uparrow) \tag{8}$$

式中，R_{sm}为并联后电阻值；U为电容电压；U_1为取能电源启动电压。

（2）取能电源电压由启动电压升至额定电压。电压大于U_1后取能电源启动，其等效阻抗受负载、输入电压和效率的共同影响，其表达式为：

$$r=\frac{U^2}{P}\eta \tag{9}$$

式中，P为取能电源供电的各板卡总功率；η为取能电源效率。根据子模块取能电源的型式试验结果，取能电源在额定输入电压时效率最高，低于额定输入电压时，η随输入电压降低而减小。而各板卡由取能电源输出端供能，其总功率P基本恒定，不受取能电源输入电压变动的影响。

取能电源等效阻抗与均压电阻并联后阻值为：

$$R_{\mathrm{sm}}=\frac{rR_1}{r+R_1}=\frac{U^2\eta R_1}{U^2\eta+PR_1}\ \ (U_1<U<U_{\mathrm{N}},U\uparrow) \tag{10}$$

（3）取能电源电压由额定电压降至关断电压。电容电压降至关断电压之前，取能电源均正常工作，其等效阻抗与式（9）一致，与均压电阻并联后阻值为：

$$R_{\mathrm{sm}}=\frac{rR_1}{r+R_1}=\frac{U^2\eta R_1}{U^2\eta+PR_1}\ (U_2<U<U_{\mathrm{N}},U\downarrow) \tag{11}$$

式中，U_2为取能电源关断电压。

（4）取能电源电压由关断电压降至零。电容电压小于关断电压后取能电源关断，其等效阻抗为MΩ级别，与均压电阻并联后阻值为：

$$R_{\mathrm{sm}}=\frac{rR_1}{r+R_1}\approx R_1\ (0<U<U_2,U\downarrow) \tag{12}$$

由式（8）、（12）可知，在取能电源不工作时，子模块电容电压由均压电阻决定；由式（10）、（11）可知，当取能电源工作后，子模块电容电压由取能电源等效阻抗和均压电阻共同决定。

以预充电过程的步骤（1）为例，当各模块电压稳定后，公式（2）应修正为：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}(m)=\dfrac{R_{\mathrm{sm}}(m)}{R_{\mathrm{sm}}(1)+R_{\mathrm{sm}}(2)+\cdots+R_{\mathrm{sm}}(N)}\sqrt{2}U_1\\ U_{\mathrm{sm2}}(m)=\dfrac{R_{\mathrm{sm}}(m)}{R_{\mathrm{sm}}(1)+R_{\mathrm{sm}}(2)+\cdots+R_{\mathrm{sm}}(2N)}\sqrt{2}U_1\end{cases} \tag{13}$$

式中，$U_{\mathrm{sm1}}(m)$为换流站Ⅰ第m个子模块电压；$U_{\mathrm{sm2}}(m)$为换流站Ⅱ第m个子模块电压；$R_{\mathrm{sm}}(m)$为第m个子模块的并联电阻值。同理公式（3）修正为：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}(m)=\dfrac{R_{\mathrm{sm}}(m)}{R_{\mathrm{sm}}(1)+R_{\mathrm{sm}}(2)+\cdots+R_{\mathrm{sm}}(N)}\sqrt{2}U_1\\ U_{\mathrm{sm2}}(m)=\dfrac{R_{\mathrm{sm}}(m)}{R_{\mathrm{sm}}(1)+R_{\mathrm{sm}}(2)+\cdots+R_{\mathrm{sm}}(N)}\sqrt{2}U_1\end{cases} \tag{14}$$

公式（6）修正为：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{sm1}}(m)=\dfrac{(\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}/M+\sqrt{2}U_{\mathrm{p}})R_{\mathrm{sm}}(m)}{R_{\mathrm{sm}}(1)+R_{\mathrm{sm}}(2)+\cdots+R_{\mathrm{sm}}(2N)}\\ U_{\mathrm{sm2}}(m)=\dfrac{2\sqrt{2}U_{\mathrm{p}}}{Mn}\end{cases} \tag{15}$$

本节通过引入取能电源等效阻抗参数，对子模块仿真模型进行改进，使仿真模型更接近实际。

2 预充电时子模块均压效果劣化机理

当取能电源各参数完全一致时，根据改进后模型和公式（13）~（15）计算得到的各子模块电压一致。而实际工程中由于器件差异性和加工工艺，取能电源参数存在不一致性并导致子模块均压效果劣化，具体机理如下：

（1）取能电源启动瞬间电压基本一致。由于均压电阻和电容的差异较小，不同子模块电容电压升压速率基本一致，当电压大于取能电源启动电压U_1时，各模块取能电源开始工作，此时各模块电压值基本一致。

（2）负载及效率不一致导致取能电源启动后电压再分配。当所有子模块均已上电后，由于取能电源负载及效率不一致，根据公式（10）计算得到的电阻值存在差异，将导致各子模块电压重新分配。

（3）电压再分配过程中的正反馈效应加剧电压两极分化。以两个子模块进行均压为例，等效模型如图3所示。

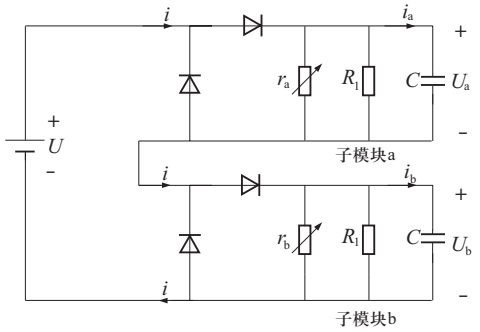


图 3 两个子模块均压时等效模型

Fig. 3 Voltage balance equivalent circuit of two sub-modules

图中两个子模块原均压电阻R_1和电容值C数值一致，两个子模块电压和为恒定值U，总电流为i；子模块a电压为U_{a}，各板卡负载为P_{a}，取能电源效率为η_{a}，电容电流为i_{a}；子模块b电压为U_{b}，各板卡负载为P_{b}，取能电源效率为η_{b}，电容电流为i_{b}。根据公式（10）计算并联后电阻R_{a}、R_{b}：

$$\begin{cases}R_{\mathrm{a}}=\dfrac{U_{\mathrm{a}}{}^2\eta_{\mathrm{a}}R_1}{U_{\mathrm{a}}{}^2\eta_{\mathrm{a}}+P_{\mathrm{a}}R_1}\\ R_{\mathrm{b}}=\dfrac{U_{\mathrm{b}}{}^2\eta_{\mathrm{b}}R_1}{U_{\mathrm{b}}{}^2\eta_{\mathrm{b}}+P_{\mathrm{b}}R_1}\end{cases} \tag{16}$$

由于取能电源负载与效率均存在差异，导致式（16）中R_{a}不等于R_{b}。如图4所示，假设R_{a}小于R_{b}，在电压再分配过程中子模块a的电容因R_{a}较小而放电，使U_{a}降低；而U_{a}降低导致R_{a}减小；同时U_{a}降低导致取能电源开关器件电流值和导通损耗增大，其效率η_{a}降低，使R_{a}进一步减小；R_{a}减小进一步降低U_{a}；最终形成正反馈效应，使U_{a}电压不断降低，U_{b}电压不断升高。

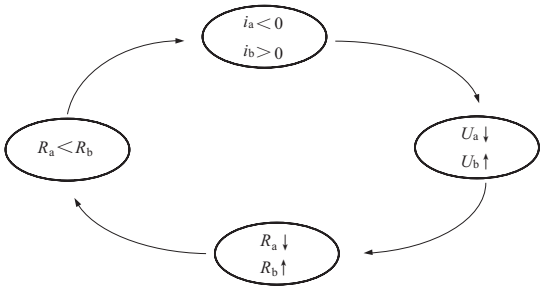


图 4　电压再分配过程中正反馈效应

Fig. 4　Positive feedback effect in the process of voltage balance

在电压再分配过程中，两个子模块电压和等于直流电压，即：

$$U = U_a + U_b \tag{17}$$

根据KCL定律，

$$i = \frac{U_a}{R_a} + i_a = \frac{U_b}{R_b} + i_b \tag{18}$$

设时间变化步长为Δt，子模块a电压变化量为ΔU_a，子模块b电压变化量为ΔU_b。当时间变化步长Δt较小时，忽略电容充放电电流变化量，电容在Δt内以恒定电流值进行充放电。则电容电压变化量为：

$$\begin{cases} \Delta U_a = i_a \Delta t / C \\ \Delta U_b = i_b \Delta t / C \end{cases} \tag{19}$$

由于两个子模块电压和为恒定值，两个子模块电压变化量之和为零，即：

$$\Delta U_a + \Delta U_b = 0 \tag{20}$$

公式（18）~（20）联立计算得：

$$\begin{cases} \Delta U_a = \dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U_b}{R_b} - \dfrac{U_a}{R_a}\right) \\ \Delta U_b = \dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U_a}{R_a} - \dfrac{U_b}{R_b}\right) \end{cases} \tag{21}$$

将公式（16）、（17）代入公式（21）中得到两个子模块电压变化计算公式：

$$\begin{cases} \Delta U_a = \dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U - 2U_a}{R_1} + \dfrac{P_b}{U\eta_b - U_a\eta_b} - \dfrac{P_a}{U_a\eta_a}\right) \\ \Delta U_b = \dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U - 2U_b}{R_1} + \dfrac{P_a}{U\eta_a - U_b\eta_a} - \dfrac{P_b}{U_b\eta_b}\right) \end{cases} \tag{22}$$

假设R_a小于R_b，根据公式（22）仿真得到子模块电压变化趋势，仿真结果如图5所示。可见子模块a电压不断降低，子模块b电压不断升高。

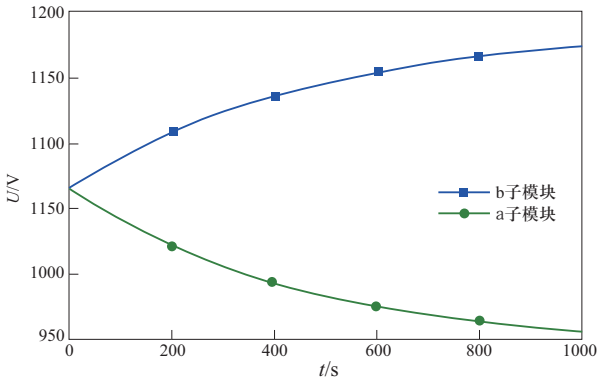


图 5　两个子模块均压时电压波形

Fig. 5　Voltage balance waveforms of two sub-modules

（4）均压效果劣化程度与总电压值呈反比。当总电压较高时，上电瞬间各子模块电压较高，取能电源等效阻抗较大，对原均压电阻影响较小。根据公式（16）计算并联后电阻可知，各子模块间电阻值差异较小，降低了均压效果劣化程度。如图6所示，设置不同的总电压，根据公式（22）仿真两个子模块电压变化趋势，可见总电压较低时，一子模块会升至最大值，另一子模块会降至零；当总电压适中时，两个子模块会达到动态平衡；当总电压较高时，两个子模块电压差异较小。因此在预充电步骤（1）时，换流站Ⅱ子模块由于总电压较低导致模块间均压效果最差。

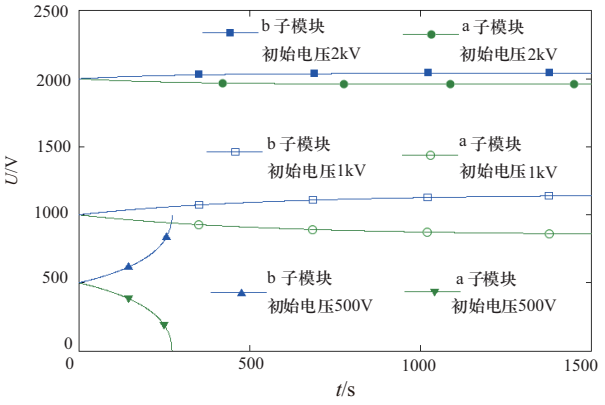


图 6　两个子模块在不同初始电压时均压波形

Fig. 6　Voltage balance waveforms of two sub-modules under different initial voltage value

（5）总电压较低时导致部分模块因欠压保护重复启停。根据仿真结果可知，总电压低时，部分子模块电压会逐渐降低至零。但由于取能电源设置了欠压保护，电容电压降至关断电压U_2以下时，取能电源等效阻抗突变为MΩ级别，根据公式（12）知电阻突升至R_1，由于电阻变大，此部分子模块电容开始充电，电

压逐渐升高；电压升至启动电压U_1后取能电源重新工作，根据公式（10）知电阻发生突降，子模块电容放电，电压又逐渐降低。由于取能电源欠压保护和等效阻抗的突变，以上过程如此反复，使此部分子模块反复启停。

子模块反复启停时电压降低过程可根据公式（22）仿真；子模块电压升高过程中，公式（21）应修正为（假设a模块重复启停）：

$$\begin{cases}\Delta U_{\mathrm{a}}=\dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U_{\mathrm{b}}}{R_{\mathrm{b}}}-\dfrac{U_{\mathrm{a}}}{R_1}\right)\\ \Delta U_{\mathrm{b}}=\dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U_{\mathrm{a}}}{R_1}-\dfrac{U_{\mathrm{b}}}{R_{\mathrm{b}}}\right)\end{cases}\tag{23}$$

公式（22）应修正为：

$$\begin{cases}\Delta U_{\mathrm{a}}=\dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U-2U_{\mathrm{a}}}{R_1}+\dfrac{P_{\mathrm{b}}}{U\eta_{\mathrm{b}}-U_{\mathrm{a}}\eta_{\mathrm{b}}}\right)\\ \Delta U_{\mathrm{b}}=\dfrac{\Delta t}{2C}\left(\dfrac{U-2U_{\mathrm{b}}}{R_1}-\dfrac{P_{\mathrm{b}}}{U_{\mathrm{b}}\eta_{\mathrm{b}}}\right)\end{cases}\tag{24}$$

根据公式（22）、（24）可仿真得到子模块反复启停时电压波形。如图7所示，仿真波形与试验波形变化趋势基本一致，子模块取能电源进入反复启停状态。

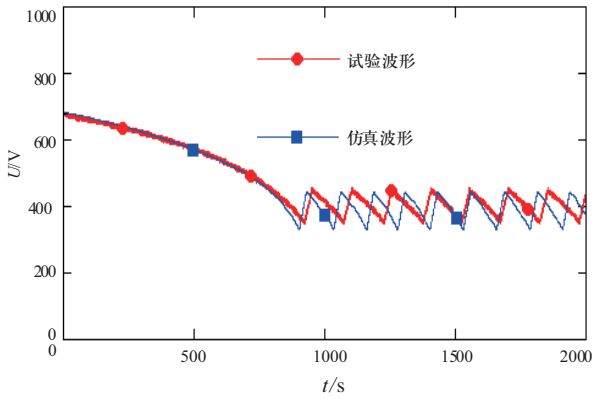


图 7　子模块反复启停时电压波形

Fig. 7　Voltage of sub-module at repeatedly startup state

（6）多模块均压时电压基本呈现均匀分布。以上分析以两个子模块均压为例，当多个子模块均压时，公式（17）~（20）应修正为：

$$\begin{cases}U=U_1+U_2+\ldots+U_m\\ i=\dfrac{U_1}{R_1}+i_1=\dfrac{U_2}{R_2}+i_2=\ldots=\dfrac{U_m}{R_m}+i_m\\ \Delta U_1+\Delta U_2+\ldots+\Delta U_m=0\\ \Delta U_k=\dfrac{\Delta t}{C}i_k\end{cases}\tag{25}$$

式中，m为均压子模块总数量；k为其中任一子模块。根据公式组（25），通过叠代求解方法可仿真得到各子模块电压变化波形。

根据实际测量，各取能电源等效阻抗基本呈均匀分布。以21个子模块均压为例，设定各子模块等效阻抗初始值从最大值到最小值均匀分布，根据公式（25）仿真得到各子模块电压变化情况。如图8所示，上电后约有一半的子模块电容充电，电压逐渐升高；另一半子模块电容放电，电压逐渐降低。各子模块稳定后电压值基本呈现均匀分布。

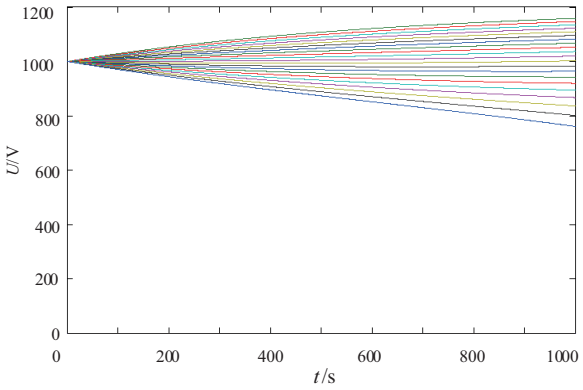


图 8　多个子模块均压时电压波形

Fig. 8　Voltage balance waveforms of several sub-modules

3　均压效果劣化的危害及改进措施

由取能电源不一致性导致均压效果劣化的危害主要包括以下几个方面：

（1）子模块电压两极分化导致部分模块电压过低，甚至反复启停。反复启停过程中取能电源开关器件易产生过电压或过电流，降低取能电源寿命。

（2）子模块电压两极分化导致部分模块过压，开关器件因电压过大而击穿。

（3）影响解锁后子模块电容电压均压效果。现有文献研究均压算法时未考虑取能电源等效阻抗动态变化，采用本文子模块模型后可更接近实际工程，进一步验证均压算法的效果。

针对预充电过程中子模块均压效果劣化的问题，应采取以下改进措施：

（1）设置取能电源电压差。使取能电源关断电压远小于启动电压，降低子模块反复启停的次数。

（2）提高取能电源参数一致性。

（3）降低各控制板卡功率。降低功率可使取能电源等效阻抗变大，降低对原均压电阻影响。

（4）适当降低原均压电阻阻值，使并联后电阻值

更接近原均压电阻值，但过度降低阻值会导致电阻功耗过大。

（5）减少预充电运行时间。为防止子模块电压跌落至反复启停的阶段，应减少预充电运行时间，可将此时间写入控制保护定值单中。

（6）改变取能工作方式。采用激光送能等方式可彻底解决因取能电源不一致性导致的均压效果劣化问题，但存在研发周期长、成本较高、效率低等缺陷。

4 结论

本文分析了取能电源等效阻抗动态变化情况，并将取能电源等效阻抗引入子模块仿真模型中，使其更接近工程实际。根据改进后模型分析了MMC换流器预充电过程中子模块均压效果劣化的机理，即由于取能电源参数不一致性导致子模块电压再分配，等效阻抗与电压值形成正反馈，进一步加剧电压两极分化，最终导致子模块均压效果劣化。本文推导出预充电过程中多个子模块串联时电容电压变化的数学公式并可仿真出相应电压波形。

预充电过程中子模块均压效果劣化会导致部分子模块过压、部分子模块欠压并重复启停等问题。本文提出了降低预充电时间、适当降低均压电阻、严格筛选取能电源以提高参数一致性和降低板卡功耗等措施，为柔性直流输电工程运行参数调整和MMC换流器优化设计提供理论依据。

参考文献

[1] 王姗姗，周孝信，汤广福，等．模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]．中国电机工程学报，2011，31(24)：1-8．
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8(in Chinese).

[2] NIKOLAS FLOURENTZOU, VASSILIOS G AGELIDIS, GEORGIOS D DEMETRIADES．VSC-based HVDC power transmission systems : an overview[J]．IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602．

[3] CUIQING DU, EVERT AGNEHOLM, GUSTAF OLSSON. Use of VSC-HVDC for industrial systems having onsite generation with frequency control[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 2008，23(4)：2233-2240．

[4] Antonio de la Villa Jaén, Enrique Acha, Antonio Gómez Expósito．Voltage source converter modeling for power system state estimation: STATCOM and VSC-HVDC[J]．IEEE Transactions on Power Systems, 2008，23(4)：1552-1559．

[5] CHRISTIAN M FRANCK．HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 2011，26(2)：998-1007．

[6] 杨文博，宋强，朱喆，等．模块化多电平换流器的直流内电势解耦控制方法[J]．中国电机工程学报，2016，36(3)：648-655．
YANG Wenbo, SONG Qiang, ZHU Zhe, et al．Decoupled control of inner DC electric potential of modular multilevel converter[J]．Proceedings of the CSEE, 2016，36(3)：648-655(in Chinese)．

[7] 汤广福，贺之渊，庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]．电力系统自动化，2013，37(15)：3-14．
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui．Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]．Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15)：3-14(in Chinese)．

[8] KALCON G O, ADAM G P, ANAYA-LARA O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems[J]．IEEE Transactions on Power Systems, 2012，27(4)：1818-1830．

[9] ANGQUIST L, ANTONOPOULOS A, SIEMASZKO D, et al. Open-loop control of modular multilevel converters using estimation of stored energy[J]．IEEE Transactions on Industry Applications, 2011，47(6)：2516-2524．

[10] 杨文博，宋强，刘文华，等．降低模块化多电平换流器子模块电容值的控制方法[J]．电力系统自动化，2015，39(16)：86-94．
YANG Wenbo, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al．A control strategy for reducing submodule capacitance value of modular multilevel converter[J]．Automation of Electric Power Systems, 2015，39(16)：86-94(in Chinese)．

[11] 丁冠军，丁明，汤广福，等．新型多电平VSC子模块电容参数与均压策略[J]．中国电机工程学报，2009，29(30)：1-6．
DING Guanjun, DING Ming, TANG Guangfu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009，29(30)：1-6(in Chinese)．

[12] 阎发友，汤广福，贺之渊，等．一种适用于模块化多电平换流器的新型环流控制器[J]．电力系统自动化，2015，38(1)：104-108．
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al．A novel circulating current controller for modular multilevel converter[J]．Automation of Electric Power Systems, 2015，38(1)：104-108(in Chinese)．

[13] BERGNA G, VANNIER J C, LEFRANC P, et al．Modular multilevel converter leg-energy controller in rotating reference frame for voltage oscillations reduction[C]// 3rd International Symposium on IEEE Power Electronics for Distributed Generation Systems．Aalborg, Denmark：IEEE, 2012：698-703．

[14] PICAS R, POU J, CEBALLOS S, et al．Optimal injection

of harmonics in circulating currents of modular multilevel converters for capacitor voltage ripple minimization[C]// 2013 IEEE ECCE Asia Downunder. Melbourne, Australia：IEEE, 2013：318-324.

[15] ILVES K, ANTONOPOULOS A, HARNEFORS L, et al. Capacitor voltage ripple shaping in modular multilevel converters allowing for operating region extension[C]// 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronic Society. Melbourne, Australia：IEEE, 2011：4403-4408.

[16] 孔明. 模块化多电平VSC-HVDC换流器充电动态特性及其控制研究[D]. 北京：中国电力科学研究院，2011.

[17] 董云龙，田杰，黄晓明，等. 模块化多电平换流器的直流侧主动充电策略[J]. 电力系统自动化，2014，38(24)：68-72.
DONG Yunlong, TIAN Jie, HUANG Xiaoming, et al. A DC-side active charging strategy for modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014，38(24)：68-72(in Chinese).

[18] FAN S, ZHANG K, XIONG J, et al. An improved control system for modular multilevel converters featuring new modulation strategy and voltage balancing control[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, USA：IEEE, 2013：4000-4007.

[19] ZHANG Y, ADAM G P, LIM T C, et al. Analysis of modular multilevel converter capacitor voltage balancing based on phase voltage redundant states[J]. IET Power Electronics, 2012，5(6)：726-738.

[20] 王海田，汤广福，贺之渊，等. 模块化多电平换流器的损耗计算[J]. 电力系统自动化，2015，39(2)：112-118.
WANG Haitian, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Power losses calculation of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 112-118(in Chinese).

[21] 杨英，董舒怡，陈红坤，等. 三种主接线方式下柔性直流输电系统换流站内部过电压仿真[J]. 南方电网技术，2015，9(7)：2-10.
YANG Ying, DONG Shuyi, CHEN Hongkun, et al. Inner overvoltage simulation of converter station of MMC-HVDC system in three kinds of main wiring modes[J]. Southern Power System Technology, 2015，9(7)：2-10(in Chinese).

收稿日期：2017–11–17。

李超

作者简介：

李超（1983），男，博士，高级工程师，博士后在站研究人员，研究方向为智能变电站相关技术，E-mail:onlychance@sina.com。

方日升（1969），男，博士，高级工程师，研究方向为电力市场规划技术。

唐志军（1973），男，硕士，高级工程师，研究方向为电力系统继电保护与自动化技术。

（责任编辑　赵杨）