

# 希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型

付 华, 于 翔

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)子模块均压控制问题一直是高压直流输电系统能否稳定运行的关键。当子模块数目较为庞大时,传统基于排序算法的均压模型会使得电容电压排序计算量加大,占用大量资源,为硬件的设计带来巨大困难。为此,设计了一种希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型。通过对当前与上一个周期中所投入子模块的数量及各子模块电容电压与其平均值的偏差是否超过界限,判断是否再次计算触发脉冲,偏差的大小决定子模块是否投入,利用希尔排序算法对桥臂处于不同状态时满足相应判定条件的子模块进行排序,按照排列后的顺序依次投入,保证了系统的高效可靠运行。在 PSCAD/EMTDC 上搭建模块化多电平换流器的仿真模型,验证所提出的子模块均压控制模型的正确性。仿真结果验证了该控制模型在低频下能够很好地实现子模块电容电压的均衡控制。

**关键词:** 模块化多电平换流器;均压控制;偏差控制;希尔排序算法;开关频率

## Capacitor Voltage Balancing Model for Modular Multilevel Converter Using Shell Sorting Algorithm and Bias Control

FU Hua, YU Xiang

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** The voltage balancing problem of sub-modules(SMs) in a modular multilevel converter(MMC) is the key to the stable operation of high voltage direct current(HVDC) transmission system. However, when the number of SMs is excessive, the voltage balancing model based on the traditional sorting algorithm will lead to a large amount of computation load when sorting the capacitor voltages and thus occupies numerous resources, which poses a challenge to the design of hardware. To this end, an improved capacitor voltage balancing model for MMC is designed based on Shell sorting algorithm and bias control. To determine whether to recalculate the trigger pulse or not, the numbers of on-state SMs in the previous and present control cycles are compared, together with the detection of deviation between capacitor voltages of SMs and their average value. In addition, the value of deviation determines whether the SMs should be put into operation or not. The Shell sorting algorithm is used to sort the SMs that satisfy the corresponding decision criteria when the bridge arm is in different states, and the SMs are input according to the sequence after arrangement, thus ensuring the efficient and reliable operation of the system. An MMC model was set up in PSCAD/EMTDC, and the validity of the voltage balancing control model for SMs was verified. Simulation results showed that this control model can effectively realize the balancing control of capacitor voltage of SMs at a low frequency.

**Keywords:** modular multilevel converter; voltage balancing control; deviation control; Shell sorting algorithm; switching efficiency

电压源型换流器 VSC(voltage-sourced convert-

er)能够独立控制有功功率及无功功率,实现潮流

收稿日期:2016-07-28;修回日期:2018-02-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274118);辽宁省重点实验室资助项目(LJZS003)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51274118); Liaoning Provincial Key Laboratory Project (LJZS003)

翻转<sup>[1-2]</sup>,适合高压直流输电 HVDC(high voltage direct current)系统<sup>[3-5]</sup>。模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)继承了电压源型换流器的优势且有开关频率小、波形质量高、易于通过电压均衡控制模型实现均压的优势,克服了现有 VSC-HVDC 拓扑结构存在的开关频率高、损耗大、开关器件动作一致性差的问题,避免了直接串联大量的开关器件,更适用于柔性直流输电领域<sup>[6-8]</sup>。

目前,对模块化多电平换流器在环流抑制及直流故障穿越等方面开展了广泛研究,其中,子模块均压控制问题是高压直流输电系统稳定运行的关键与难点。MMC 均压问题包括:桥臂内子模块电容电压平衡、桥臂间电压平衡和换流器储能控制。而实时采集子模块电容电压信息排序以及应用载波移相调制技术为目前常被采用的两类 MMC 均压技术。文献[9]采用质因子分解法,通过对子模块分组均压减少了参与均压的子模块数,提出组间电压平衡算法维持组间电压的平衡,使桥臂内子模块电容电压达到平衡的同时,减少控制器的运算量,但当桥臂子模块数量很大时,控制器难以承受巨大的运算量。文献[10]提出模块化多电平变流器的子模块分组调制及均压控制,将各个子模块组视为可控电压源,子模块组之间只存在弱耦合,通过控制子模块组的充放电实现子模块组之间的电容电压平衡,降低了对硬件的速度以及实时性的要求,但由于该算法的核心是在调制波中叠加直流分量和交流分量,其对硬件的速度及实时性要求较高;文献[11]提出一种快速的模块化多电平换流器电压均衡控制模型,基于电容电压平均值比较原理,无需对电容电压进行排序,能够在较低开关频率下实现电压的均衡控制,相比于基于电容电压排序的均衡控制模型计算量小,但由于该算法对所投入的子模块未进行排序,影响了 MMC 的运行效率;文献[12]采用质因子分解法与希尔排序算法的 MMC 电容均压模型,基于质因子分解法提出一种优化的混合排序法,引入希尔排序算法大幅度降低排序次数,通过对文献[9]的算法进行优化,从而降低仿真时间及其对系统硬件的要求,但由于该混合算法的核心仍是

对电容电压进行排序,当桥臂子模块数量较大时仍会产生很大的运算量,加大控制器的负担。

基于上述问题,为减小因电容电压排序对控制器所造成的负担,提高控制系统的动态响应速度,提出了一种希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型,该模型基于电容电压偏差控制原理,不需要对子模块电容电压进行排序,极大缩减了控制器的运算量,通过希尔排序算法对桥臂处于不同状态时满足相应判定条件的子模块进行排序,按照排列后的顺序依次投入,保证了系统的高效可靠运行,能够在较低开关频率下实现电压的均衡控制,在 PSCAD/EMTDC 上搭建 MMC 的仿真模型,验证了所提出的子模块均压控制模型的有效性。

## 1 MMC 的结构与原理

MMC 由 6 个桥臂组成<sup>[13-14]</sup>,图 1 为 MMC 结构图及其经典子模块结构。半 H 桥型子模块 HBSM(half-bridge sub-module)结构如图 1 右侧所示,其中  $i_{in}$  为桥臂电流,  $U_c$  为电容电压。每个子模块有 2 个全控型开关,处于正常运行状态时上、下开关互补导通,通过控制开关的触发来控制子模块电容的投入或切除。若任意时刻上下桥臂同时投入的子模块总和为  $n$ ,则可保持直流侧电压  $U_{dc}$  恒定不变,通过对上、下桥臂投入个数进行控制可以跟踪控制系统解调电压,并通过投入以及切除子模块来合成交流侧电压<sup>[15]</sup>。

当高压大容量的直流输电中应用 MMC 时,需

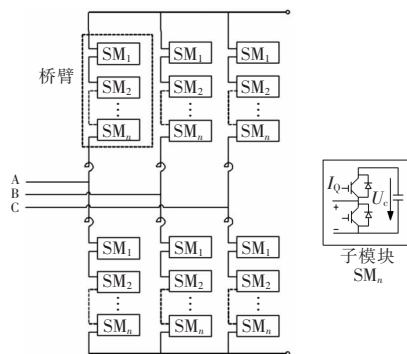


图 1 MMC 结构

Fig.1 Structure of MMC

串联几十或上百个子模块,其电平数也将达到几十或上百个,此时,谐波问题已不再是主导,通过对其进行阶梯波调制就能够很好地输出高质量的电压波形,其开关次数远远小于脉宽调制 PWM(pulse width modulation),可大幅减小开关损耗。当子模块数量较多时,最近电平逼近调制 NLM(nearest level modulation)算法具有较大优势,利用最近电平瞬时值来逼近调制波,当电平数较多时能够在较低开关频率下跟踪控制层相电压参考值指令  $U_t$ ,故主要研究基于 NLM 的分组阶梯波调制算法。

其基本原理可表示为

$$\begin{cases} n_s = \frac{n}{2} - \text{round}\left(\frac{U_t}{U_{c0}}\right) \\ n_x = \frac{n}{2} + \text{round}\left(\frac{U_t}{U_{c0}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\text{round}(\cdot)$ 为取与括号内计算量最接近的整数函数; $n_s$ 、 $n_x$ 分别为上、下桥臂所投入子模块的个数; $U_{c0}$ 为电容电压的额定值。当换流器桥臂控制层收到由最近电平控制算法所得的应投入子模块个数  $n$  后,利用电容电压均衡控制模型,选择数目为  $n$  的子模块投入运行。

## 2 偏差控制模型

传统 MMC 子模块均压控制原理为:按照单一独立桥臂(指所有相的上、下桥臂)上的电流方向与子模块导通数目对子模块的电容电压进行排序<sup>[16-17]</sup>。如果桥臂电流的方向为电容充电方向,将投入低电压值的子模块,反之,则投入高电压值的子模块。单个桥臂上的子模块之间的电容电压在子模块均压控制算法的持续作用下差别细微,能够实现直流电压的稳定。但传统 MMC 子模块均压控制模型占用了控制器大量的运算资源使其运算负担大为加重。设计了一种希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型,极大降低了控制器的运算量,缓解了其繁重的负担<sup>[16-17]</sup>。

由于 MMC 子模块均压控制并没有要求子模块电容电压值大小完全一致,而是对各子模块电容电压值在额定值附近波动幅度有所要求,故可对电容

电压的一致性作合理取舍从而减小全控型器件的开关频率,提高其使用寿命<sup>[18-19]</sup>。

偏差控制进行初始化处理:将当前控制周期内子模块投入数目记为  $n$ ,上一控制周期子模块投入数目记为  $n_{pre}$ 。其中  $n$  值的下限为 0,  $n$  值的上限为  $n_{max}$ ,即  $n \in [0, n_{max}]$ 。当  $n=0$  时切断桥臂中投入运行的所有子模块;当  $n=n_{max}$  时,将所有的子模块投入运行;如果  $n$  值位于上下限值之间,便要求桥臂中所有子模块电容电压  $U_c$  同其平均值  $U_{cavg}$  的偏差  $\Delta U_c$ 。设电容电压越界的最大偏差为  $\Delta U_{cmax}$ ,当  $\Delta U_c > \Delta U_{cmax}$  或  $n \neq n_{pre}$  时应根据偏差控制对触发脉冲进行重新计算。

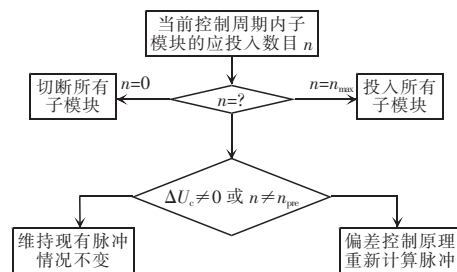


图 2 偏差控制初始化

Fig.2 Initialization of deviation control

## 3 改进的偏差控制模型

### 3.1 希尔排序算法

希尔排序算法于 1959 年由 Shell 提出,是一种插入排序算法的改进算法<sup>[20]</sup>。核心思想为:将需要进行比较的全部元素按其下标一定增量的选取分为若干个区域,以达到令某一元素向目标位置大步前进的目的。随着排序过程中下标增量  $\mu$  的减小,算法最终转化为普通的插入排序算法完成排序过程。所关注的是,先前用较大下标增量进行排序的有序性不会因较小的下标增量排序而改变。

设给定目标序列的长度为  $L$ ,则希尔排序算法对其排序的过程如下:首先取一个较大整数作为第一个下标增量  $\mu_1(\mu_1 < L)$ 。所有距离为  $\mu_1$  倍数的元素被放置在同一组中,并在各个组内先进行插入排序。其次,取一个整数作为第 2 个下标增量  $\mu_2(\mu_2 < \mu_1 < L)$ ,重复上述过程,直至所取下标增量  $\mu_n$  使所有

元素被放在同一组中。

设有 4 个偏差值元素需要被排序, 已知  $\Delta U_{c1} > \Delta U_{c2} > \Delta U_{c3} > \Delta U_{c4}$ , 则下标增量  $\mu_n$  分别取为 3、2、1, 排序情况如图 3 所示。

图 3 中, 小箭头所指的两个偏差值元素为下标增量  $\mu$  取不同值时参与比较的元素, 所有距离为  $\mu_n$  倍数的元素被放在同一个组中, 只要最终下标增量  $\mu_n=1$ , 则所有元素会被完全排序。对于大量元素进行排序的情况, 文献[13]已证明当选取下标增量为  $2^{k-1}$  时 ( $K \in Z$ ), 序列被完全排列完成的最大时间复杂度为  $O(N^{1.5})$ , 此时下标增量  $\mu$  的取值较为合理。

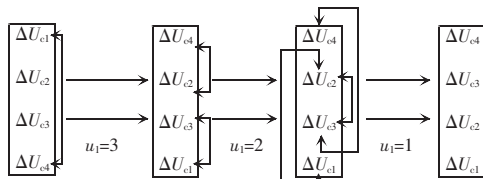


图 3 希尔排序算法

Fig.3 Shell sorting algorithm

### 3.2 希尔排序算法优化偏差控制的子模块均压模型

综上所述, 基于希尔排序算法优化偏差控制的子模块均压模型如图 4 所示, 具体实现过程如下:

(1) 建立子模块序号寄存器  $R_s$ , 对寄存器中第  $i$  个元素进行初始化, 即令  $R_{si}=i$ , 设定排序允许电压偏差  $\Delta U_{allow}$ 。

(2) 当桥臂电流  $i_{ba}$  为 0 时, 保持寄存器  $R_s$  内现有子模块次序及开通状态不变。

(3) 当桥臂电流  $i_{ba}$  大于 0 时, 处于充电状态, 子模块电容电压基准值为:  $U_{datum}=U_{cavg}+\Delta U_{allow}$ , 将  $R_s$  记录序号的子模块电容电压与该基准值进行比较。若电容电压小于  $U_{datum}$  (即  $\Delta U_c < 0$ ), 即满足充电状态下优先开放条件, 将经希尔排序算法排序后的子模块依次由前向后存入新的寄存器  $R_{s\_new}$  中; 若电容电压大于  $U_{datum}$ , 则将子模块依次反向存入  $R_s$  中, 直到所有子模块重排完成。

(4) 当桥臂电流  $i_{ba}$  小于 0 时, 处于放电状态, 子模块电容电压基准值为:  $U_{datum}=U_{cavg}-\Delta U_{allow}$ , 将  $R_s$  记录序号的子模块电容电压与该基准值进行比较。若电容电压大于  $U_{datum}$  (即  $\Delta U_c > 0$ ), 即满足放电状态

下优先开放条件, 将经反向希尔排序算法排序后的子模块依次由前向后存入新的寄存器  $R_{s\_new}$  中; 若电容电压小于  $U_{datum}$ , 则将子模块依次反向存入  $R_s$  中, 直到所有子模块重排完成。

(5) 新排序完成后, 依次从新寄存器  $R_{s\_new}$  中按照所需开通子模块数目选取子模块进行开通处理。

基于希尔排序算法优化偏差控制的子模块均压模型保证了其投入的子模块尽量满足优先开放条件, 通过设置排序允许电压偏差  $\Delta U_{allow}$ , 降低了因微小电压波动所造成的开关频繁动作, 同时保证了优先被投入到桥臂中的子模块满足相应条件, 即按照偏差值  $\Delta U_c$  由大到小的排列序列中依次选取, 保证了系统高效可靠运行。

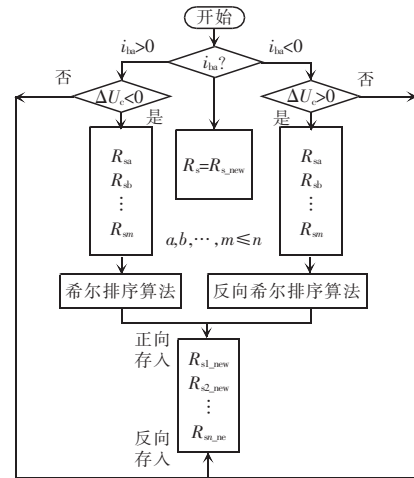


图 4 混合均压控制模型

Fig.4 Mixed voltage balancing control model

## 4 仿真实验

通过在 PSCAD/EMTDC 上搭建两端 MMC-HVDC 系统模型, 对所提的希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型的正确性进行验证。设定单个桥臂上的子模块数为 100 个, 表 1 给出了模型具体参数设置。

基于传统的按照单一独立桥臂上电流方向与子模块导通数目对子模块电容电压进行排序的 MMC 子模块均压控制模型进行对比实验。

分别将传统子模块均压控制模型与希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型在所搭建



的模块中投入运行,具体的运行形式与单个桥臂排序次数如表 2 所示。

由表 2 可知,采用希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型相较于传统方法能大幅减少单个桥臂排序次数,最大程度减少实际仿真时间,提高计算速度,减轻控制系统的运算负担。

表 1 MMC-HVDC 模型具体参数

Tab.1 Specific parameters of MMC-HVDC model

参数	数值
交流系统电压 $U_s/kV$	230
短路比	20
变压器变比	230/225( $Y_0/\Delta$ )
变压器漏抗 $L_l/mH$	50(副边)
桥臂电抗 $L/mH$	33
变压器额定容量 $S_m/(MV \cdot A)$	480
有功功率 $P_s/MW$	200
直流电压 $U_{dc}/kV$	$\pm 200$
子模块电容 $C_0/mF$	5
子模块电容电压 $U_c/kV$	4
单个桥臂子模块数	100

表 2 不同子模块均压控制模型排序次数比较

Tab.2 Comparison of sorting number between different sub-module voltage balancing control models

子模块均压控制模型	运行形式	单个桥臂排序次数	仿真时间/s
传统方法	排序	4 950	1 345
混合方法	偏差控制+ 分组排序	110	125

图 5 为 2 种不同均压控制模型单相子模块工作状态,可以看出,采用希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型能够显著降低子模块的开关频率及 IGBT 开关过程所造成的开关损耗。

图 6 为单个桥臂上 100 个子模块在 2 种不同均压控制模型下的电容电压波形。可见,无论是希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型还是传统方法,对于子模块电容电压的平衡作用相当,子模块电容电压均能够保持在其额定值附近波动。

图 7~图 8 为分别采用传统方法、希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型的 MMC 系统

特性,二者均采用定直流电压、定交流电压、定有功功率控制的站级控制。由仿真结果可知,采用混合

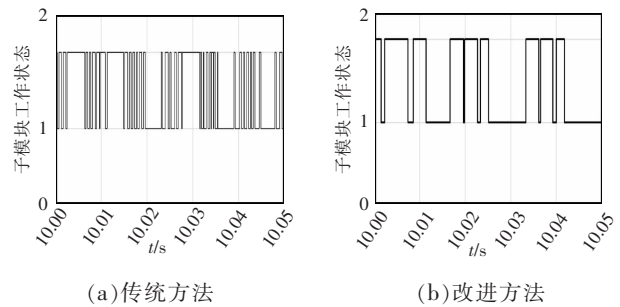


图 5 2 种不同均压控制模型单相子模块工作状态

Fig.5 Single-phase sub-module working state of two different voltage balancing control models

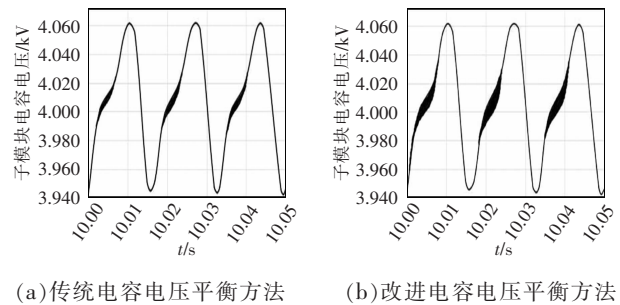


图 6 两种不同均压控制模型单相子模块电容电压

Fig.6 Capacitor voltage of single-phase sub-module of two different voltage balancing control models

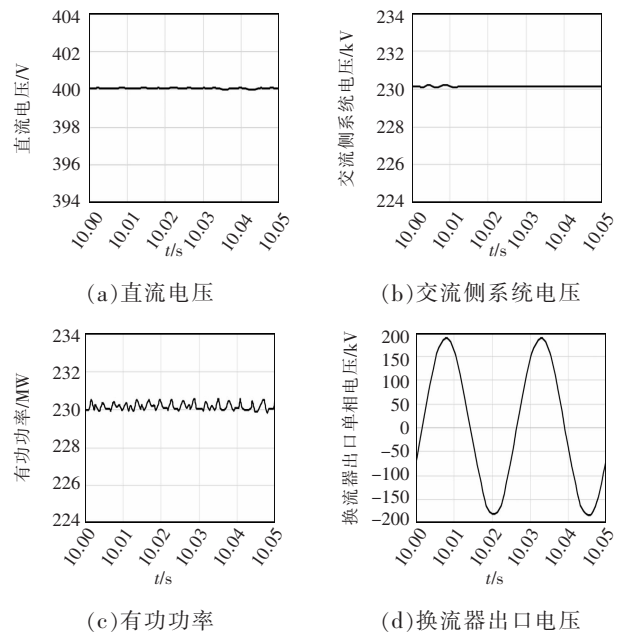


图 7 传统方法的 MMC 系统特性

Fig.7 Characteristics of MMC system using the traditional method

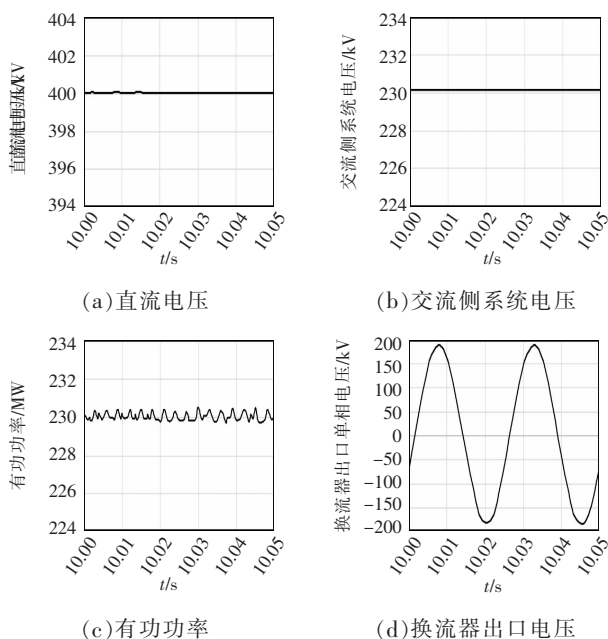


图8 混合算法的 MMC 系统特性

Fig.8 Characteristics of MMC system using the mixed algorithm

算法的子模块均压控制模型不影响系统的正常运行,其系统特性与采用传统方法运行时几乎一致。

## 5 结论

本文提出一种希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型,在减轻控制器运算负担的前提下,实现子模块均压控制目的。通过在 PSCAD/EMTDC 上搭建两端 MMC-HVDC 系统模型,与传统均压控制方法在实际仿真时间、电容电压平衡效果以及系统特性方面进行对比研究,结论以下。

(1)相较于传统均压控制方法,希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型能够明显减少实际仿真时间,提高仿真效率,降低子模块开关频率以及开关损耗。

(2)采用希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型与采用传统均压方法相比在电容电压平衡效果方面基本一致。

(3)采用希尔排序算法优化偏差控制的 MMC 电容均压模型与传统均压方法相比在子模块电容电压、MMC 系统特性平衡效果基本相同,对 MMC-HVDC

的系统特性基本没有影响。

## 参考文献:

- [1] Xu Jianzhong, Zhao Chengyong, Liu Wenjing, et al. Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 129-136.
- [2] 杨晓峰,林智钦,周楚尧,等. 模块化多电平换流器 MMC 的环抑制技术综述[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 58-59.  
Yang Xiaofeng, Lin Zhiqin, Zhou Chuyao, et al. Survey of circulating current suppressing technologies in MMC [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6): 58-59(in Chinese).
- [3] 韦延方,王晓卫,郑征,等. 基于模块化多电平换流器的交直流混合电网稳态建模及仿真[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 112-115.  
Wei Yanfang, Wang Xiaowei, Zheng Zheng, et al. Steady-state modeling and simulation for AC/DC hybrid power system based on modular multilevel converter[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 112-115(in Chinese).
- [4] Qin Jiangchao, Saeedifard M. Reduced switching-frequency voltage-balancing strategies for modular multilevel HVDC converters[J]. 2013, 28(4): 2403-2410.
- [5] Korompili A, Wu Qiuwei, Zhao Haoran. Review of VSC HVDC connection for offshore wind power integration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 1(64): 1058-1062.
- [6] 郑涛,吴丹,宋洁莹. 基于 MMC 的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3570-3572.  
Zheng Tao, Wu Dan, Song Jieying. Based on the unification of the MMC flow controller ac fault characteristics and protection scheme[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3570-3572(in Chinese).
- [7] 吴金龙,刘欣和,王先为,等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制模型[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1593-1596.  
Wu Jinlong, Liu Xinhe, Wang Xianwei, et al. Multiterminal flexible HVDC system dc voltage hybrid control model[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1593-1596(in Chinese).

- [8] Gnanarathna U N, Gole A M, Jayasinghe R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on Electromagnetic transient simulation programs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [9] 杜晓舟, 梅军, 邓凯, 等. 模块化多电平换流器电容电压均衡控制方法[J]. 电网技术, 2015, 40(1): 26-28.  
Du Xiaozhou, Mei Jun, Deng Kai, et al. Modular multilevel converter capacitor voltage balance control method[J]. Power System Technology, 2015, 40(1): 26-28(in Chinese).
- [10] Deng Fujin, Chen Zhe. A control method for voltage balancing in modular multilevel converters[J]. IEEE Trans Power Electron, 2013, 29(1): 66-76.
- [11] 郭高鹏, 姚良忠, 温家良. 模块化多电平变流器的子模块分组调制及均压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 145-148.  
Guo Gaopeng, Yao Liangzhong, Wen Jialiang. Modular multilevel converter modules grouped modulation and equalizing control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 145-148(in Chinese).
- [12] 喻锋, 王西田, 林卫星, 等. 一种快速的模块化多电平换流器电压均衡控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 929-933.  
Yu Feng, Wang Xitian, Lin Weixing, et al. A rapid modular multilevel inverter voltage balancing control model[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 929-933(in Chinese).
- [13] 何智鹏, 许建中, 苑宾, 等. 采用质因子分解法与希尔排序算法的 MMC 电容均压模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2980-2985.  
He Zhipeng, Xu Jianzhong, Yuan Bin, et al. Using qualitative factor decomposition method with MMC capacitance voltage-sharing model of hill sorting algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2980-2985(in Chinese).
- [14] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 405-407.  
Cai Xinhong, Zhao Chengyong, Pang Hui. Supply power to passive network model MMC HVDC system control and protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 405-407(in Chinese).
- [15] Ilves K, Antonopoulos A, Norrga S, et al. A new modulation method for the modular multilevel converter allowing fundamental switching frequency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3482-3494.
- [16] Liu Pu, Wang Yue, Cong Wulong. Grouping sorting optimized model for modular multilevel converter with reduced computational load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(3): 298-306.
- [17] Moon J W, Kim C S, Park J W, et al. Circulating current control in MMC under the unbalanced voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1952-1959.
- [18] 裘鹏, 杨美娟, 章姝俊. MMC-MTDC 系统协调启动控制模型[J]. 电网技术, 2016, 39(7): 1800-1805.  
Qiu Peng, Yang Meijuan, Zhang Shujun. MMC-MTDC system coordination start control model[J]. Power System Technology, 2016, 39(7): 1800-1805(in Chinese).
- [19] 周莹坤, 齐磊, 姜舒婷. 采用最近电平控制的模块化多电平换流器损耗一致性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2490-2495.  
Zhou Yingkun, Qi Lei, Jiang Shuting. Using recent level control modular multilevel inverter loss consistency analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2490-2495(in Chinese).
- [20] Shell D L. A high-speed sorting procedure[J]. Communications of the ACM, 1959, 2(7): 30-32.



#### 作者简介:

付华(1962-),女,博士(后),教授,研究方向:智能检测和数据融合技术,Email: fxfuhua@163.com。

于翔(1992-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电气工程,Email:2511430686@qq.com。

付华