

# Capacitance-Voltage Balancing Control Method for the Submodule of Modular Multilevel Converter Based on the Rapid Sequencing Method

Maolin Tang<sup>1</sup>, Chao Xiao<sup>2</sup>, Jinxin Ouyang<sup>2</sup>, Rui Yu<sup>1</sup>, Xi Zhang<sup>1</sup>, Xiaofu Xiong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Grid Southwest Division, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: [sngeet@163.com](mailto:sngeet@163.com)

Received: Apr. 13<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

With the improvement of the engineering capacity and the DC voltage level of FACTS based on modular multilevel converter (MMC), it is putting forward higher requirement for capacitor balance control issue of MMC sub-modules (SMs). In order to reduce the computational complexity of voltage balancing sorting of SMs and switching dissipation of MMC, a new voltage balancing control improved algorithm based on Quick Sort method and divided conquer was presented in this paper: dividing into groups twice according to the switching control instruction as well as charging and discharging active status of bridge arms in each control cycle; then choosing the SMs which have large difference with rated voltage within the minimum range on the basis of specific switching number; avoiding the prophecy of collating all SMs repeatedly. A MMC model has been set up on the PSCAD. Finally, the effectiveness of the design control method was verified. The results show that this voltage balancing method can be realized effectively under low switching dissipation and low ranking calculation.

## Keywords

Modular Multilevel Converter (MMC), Sub-Module, Capacitance-Voltage Balancing Control, The Rapid Sequencing Method, Switching Frequency

---

## 基于快速排序法的MMC电容电压均衡控制策略

唐茂林<sup>1</sup>, 肖超<sup>2</sup>, 欧阳金鑫<sup>2</sup>, 余锐<sup>1</sup>, 张茜<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国家电网公司西南分部, 四川 成都

文章引用: 唐茂林, 肖超, 欧阳金鑫, 余锐, 张茜, 熊小伏. 基于快速排序法的 MMC 电容电压均衡控制策略[J]. 智能电网, 2017, 7(2): 97-104. <https://doi.org/10.12677/sg.2017.72011>

<sup>2</sup>重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆  
Email: sngheet@163.com

收稿日期: 2017年4月13日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

## 摘要

随着基于模块化多电平换流器的柔性直流输电工程容量和直流侧电压等级的提高, 对子模块电容平衡控制提出了更高的要求。为降低众多子模块均压排序的计算量及MMC开关损耗, 提出一种基于分治思想和快速排序算法的改进子模块电容电压均衡控制策略。根据每个控制周期的投切控制指令和桥臂充放电状态, 将待投切子模块电容电压值进行两轮分组, 然后根据具体投切数量在最小范围内选取与额定电容电压差值较大的子模块进行投切操作, 从而避免对所有子模块进行重复排序。最后, 通过在PSCAD/EMTDC中搭建MMC模型对本文方法进行了验证, 结果表明该策略可以有效减小排序计算量并降低MMC开关损耗。

## 关键词

模块化多电平换流器, 子模块, 电容电压均衡控制策略, 快速排序法, 开关频率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

MMC-HVDC 采用子模块级联型拓扑, 具有模块化结构易于扩展、低次谐波含量低、损耗小的优点[1][2], 使得基于模块化多电平换流器的柔性直流输电得到广泛的应用。

模块化多电平换流器直流侧储能由多个子模块直流电容电压串联维持, 直流侧电压的控制不仅需要控制总直流电压, 而且还需要对各个子模块电容电压进行均衡控制。目前, 传统基于排序的传统子模块电容电压平衡控制算法会产生较大的计算量和较高的开关频率[3]。

为提高优化子模块电压均压策略, 国内外学者在均压控制策略方面也有一定的研究工作。文献[4]提出了适用于载波相移-正弦脉宽调制策略的 MMC 电容电压优化平衡控制方法, 但不适用于最近电平逼近的调制策略。文献[5]通过改进传统均压控制法降低开关频率, 但增加了控制器计算量; 文献[6]根据电流方向触发导通的传统均压法分别引入双保持因子与能量均衡因子, 使子模块间的能量保持相对平衡; 文献[7]采用质因子分解法提出一种优化的混合排序法, 通过引入希尔排序算法大幅降低了排序次数。文献[8][9]基于冒泡法分别得到投入、退出状态的电压最值子模块, 可在较少计算量下实现电容电压的均衡控制, 但排序算法的复杂度仍有降低的空间。

针对现有排序方法普遍存在的排序算法效率和开关频率损耗不容易同时满足的问题, 本文基于快速排序法, 根据导通子模块中桥臂电流方向及子模块电容电压大小, 对三相 6 个桥臂均先选合适的分界元素将子模块电容电压值分为独立的两组值, 然后采用分治策略思想对 MMC 子模块电容电压进行选择排序, 不对每一桥臂所有子模块进行完全排序, 降低传统排序计算时间, 能更有效地提升 MMC 桥臂子模块电容均压算法的计算速度。

## 2. MMC 直流输电基本结构

如图 1 所示, a) 为 MMC 型直流输电拓扑一端的系统结构, 其中每个桥臂由  $n$  个子模块和一个电抗器  $L$  串联构成, 上下两个桥臂构成一个相单元。b) 为半桥结构的柔性直流输电 MMC 子模块[4]。  $u_C$  为子模块电容电压瞬时值, 在稳态下的直流分量为  $U_C$ 。  $u_{SM}$ 、  $i_{SM}$  分别为子模块的输出电压和电流的瞬时值。反并联二极管时, 规定  $S_{i1} = 1$ ,  $S_{i2} = 0$ , 子模块为“投入”状态, 此时子模块电容  $C$  在  $i_{SM}$  的作用下充电或放电,  $u_{SM} = u_C$ ; 反之,  $i_{SM}$  流过上侧的 IGBT 或反并联二极管时, 规定  $S_{i1} = 0$ ,  $S_{i2} = 1$ , 称该子模块为“切除”状态; 理论上不允许上下 IGBT 都流过电流的情况发生, 若  $S_{i1} = 0$ ,  $S_{i2} = 0$  则子模块闭锁。

## 3. 基于快速排序法的电容电压均衡控制策略

### 3.1. 总体控制流程

图 2 为基于快速排序法的 MMC 子模块电容电压平衡控制算法控制方法流程图。本文所述方法在已知某次需要投入子模块个数时, 根据模块充放电状态, 自定义电压基准值对待投子模块电容电压进行多轮筛选以确定进行快速排序的最小子模块电压范围, 避免对每个桥臂所有子模块电容电压进行排序, 可在桥臂子模块数量较多时, 在较低开关频率下实现电压的均衡控制, 相比于直接基于电容电压排序的均衡控制策略减小子模块电容电压总排序计算次数, 计算量较小。具体实现步骤如下:

① 定义两个数组  $A[x_{n-1}]$ 、  $B[y_{m-1}]$  分别存放桥臂中未投入的  $N$  个以及处于投入状态的  $M$  个子模块电容电压值。

② 根据换流站控制层给出的下一个控制周期需投入或切除的子模块个数, 判断以子模块电压额定值  $U_N$  为分界元素进行第一轮初步排序的数组元素来源于已投数组还是待投数组。

需投  $\Delta N$  个子模块时, 根据桥臂电流充放电状态, 选取进行第二轮排序的分界元素以及  $A[x_{n-1}]$  中需进行第二轮排序的元素; 此后, 比较  $A[x_{n-1}]$  低-低压值类子模块个数或是  $A[x_{n-1}]$  高-高压值类子模块个数

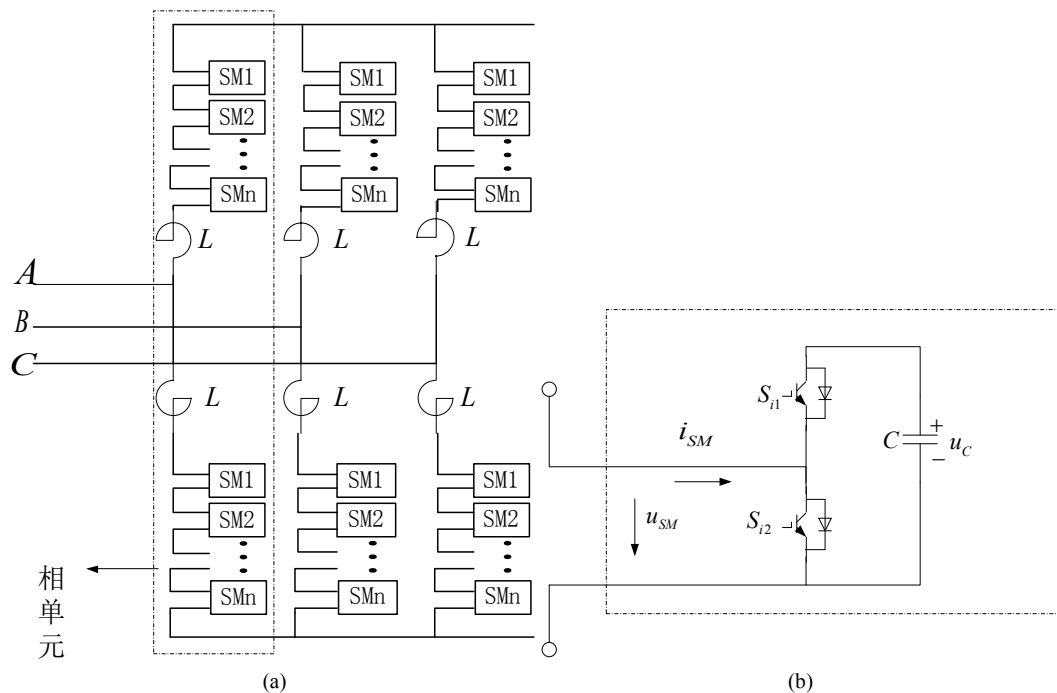


Figure 1. The topology of modular multilevel converter  
图 1. MMC 的拓扑结构

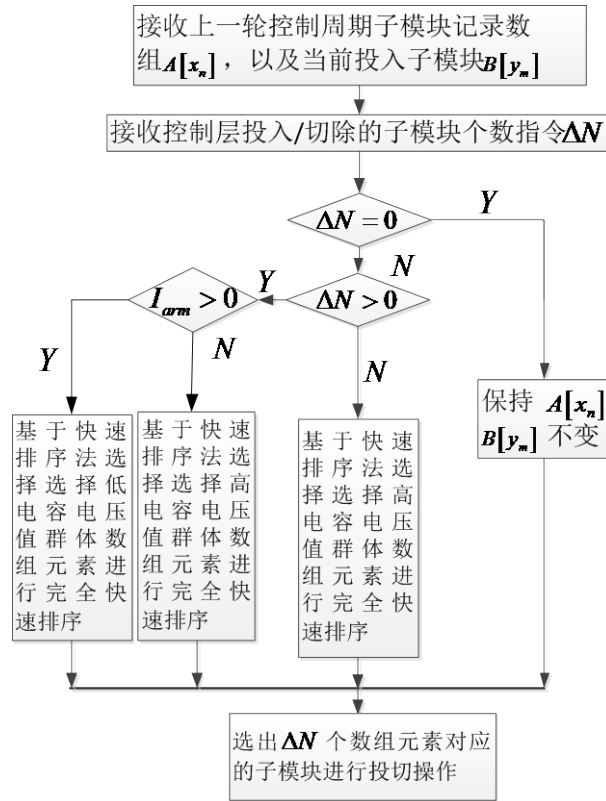


Figure 2. Arithmetic flow chart of voltage balancing control  
图 2. 电压均衡控制算法流程图

与  $\Delta N$  的大小，选取后续快速排序的数组元素。需切  $\Delta N$  个子模块时，不论桥臂电流方向，均以  $1.05U_N$  为分界元素对  $B[y_{m-1}]$  高压值类数组中的子模块电容电压值进行初步排序，并根据  $B[y_{m-1}]$  高-高压值类子模块个数与  $\Delta N$  的差值，确定进行完整快速排序法以及需投入的的数组元素。

③ 最后，等待下一个控制周期，重复步骤 1-步骤 4。

### 3.2. 需投入子模块情况均压控制策略

在原有电容电压控制策略基础上，本文基于快速排序法思想，在读取某时换流站控制层实测电压值后，将已投的  $M$  个子模块电容电压存入数组  $B[y_{m-1}]$  中， $y_m$  代表投入子模块序号，同理设定数组  $A[x_{n-1}]$  用于存放控制层实时测量的待投入子模块电容电压值，根据  $\Delta N$  的正负，判断是进行一轮排序的元素来源于数组  $A[x_{n-1}]$  或是  $B[y_{m-1}]$ ，具体算法如下所示，图 3~图 5 旨在根据换流站控制层投切指令和桥臂电流方向，确定最小的子模块排序范围，避免针对所有子模块进行排序增加计算量。

如图 3，当桥臂电流  $I_{arm}$  为充电方向时，以  $U_N$  为分界元素进行快速排序法的第一个步骤后将数组分为电容电压大于  $U_N$  和小于  $U_N$  的独立两组， $A[x_0] \sim A[x_{N_1-1}]$  及  $A[x_{N_1}] \sim A[x_{N-1}]$  内部的子模块电压大小顺序仍然是乱序。选择  $N_1$  个元素  $A[x_0] \sim A[x_{N_1-1}]$ ，以  $0.95U_N$  为第二个分界元素对其进行初步排序，得到低于  $0.95U_N$  的  $a_1$  个元素  $A[x_0] \sim A[x_{a_1-1}]$  和高于  $0.95U_N$  的  $a_2$  个元素  $A[x_{a_1}] \sim A[x_{N_1-1}]$ ，两组元素内部的子模块电压大小顺序仍是乱序。

若  $a_1 < \Delta N$ ，则对  $A[x_{n-1}]$  低-高压值类数组进行快速排序，并选取其中电压最小的  $\Delta N - a_1$  个电压所对应子模块和  $A[x_{N_1}]$  低-低压值类数组中所对应的全部子模块投入；如果  $a_1 > \Delta N$ ，则对  $A[x_{n-1}]$  低-低压值类数组进行快速排序，并选取其中电压最小的  $\Delta N$  个电压所对应子模块投入。

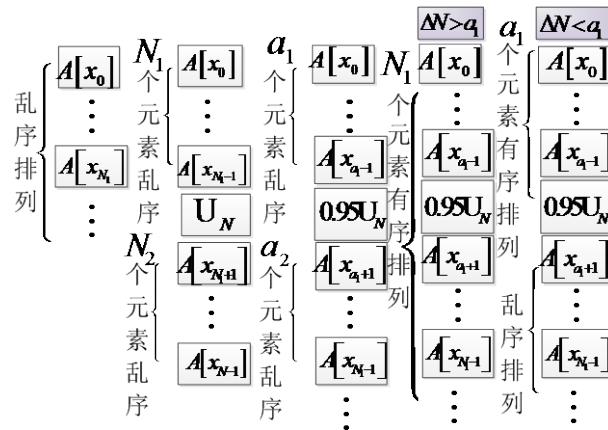


Figure 3. Arithmetic flow chart of voltage balancing control when arm-current is charging

图 3. 桥臂电流充电时均压控制算法流程图

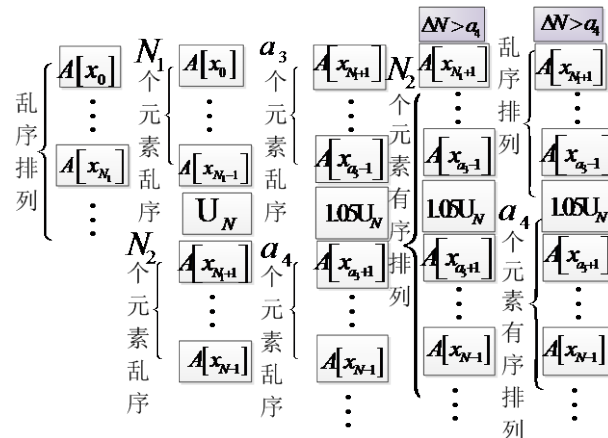


Figure 4. Arithmetic flow chart of voltage balancing control when arm-current is discharging

图 4. 桥臂电流放电时均压控制算法流程图

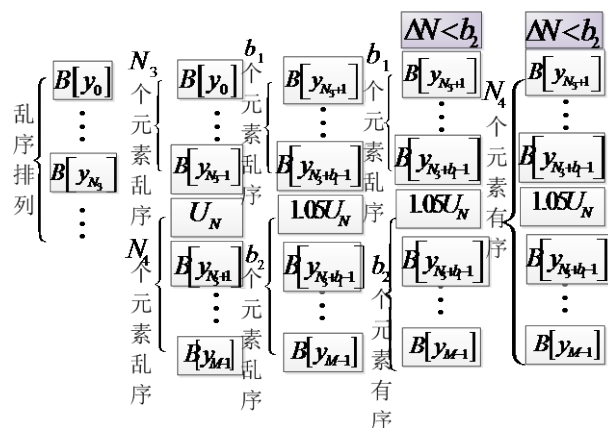


Figure 5. Arithmetic flow chart of voltage balancing control when  $\Delta N < 0$

图 5.  $\Delta N < 0$  时均压控制策略流程图

如图 4 所示，当桥臂电流  $I_{arm}$  为放电方向时，选择  $N_2$  个元素  $A[x_{N1}] \sim A[x_{N-1}]$ ，以  $1.05U_N$  为分界元素对其进

行初步排序, 得到低于  $1.05U_N$  的  $a_3$  个元素  $A[x_{N1}] \sim A[x_{N1+a3-1}]$  以及高于  $1.05U_N$  的  $a_4$  个元素  $A[x_{N1+a3}] \sim A[x_{N-1}]$ 。

若  $\Delta N < a_1$ , 则对  $A[x_{N1+a3}] \sim A[x_{N-1}]$  中元素进行快速排序, 选出需投的电容电压较高的  $\Delta N$  个子模块投入; 若  $a_4 < \Delta N$ , 则对  $A[x_{N1}] \sim A[x_{N1+a3-1}]$  使用快速排序法, 选择电容电压最高的  $\Delta N - a_4$  个对应的子模块和  $A[x_{N1+a3}] \sim A[x_{N-1}]$  对应的子模块投入。

选取合适的组别进行完整的快速排序法运算选出需投子模块, 执行完后跳至步骤 5。

### 3.3. 需切除子模块情况均压控制策略

如图 5 所示, 需切子模块在初步排序后, 分为低于  $U_N$  的  $N_3$  个元素  $B[y_0] \sim B[y_{N3-1}]$  以及高于  $U_N$  的  $N_4$  个元素  $B[y_{N3}] \sim B[y_{M-1}]$  ( $N_3 + N_4 = M$ ) 之后, 选择  $B[y_{N3}] \sim B[y_{M-1}]$ , 以  $1.05U_N$  为基准对  $B[y_{N3}] \sim B[y_{M-1}]$  进行快速排序法的第一个步骤, 得到低于  $1.05U_N$  的  $b_1$  个元素  $B[y_{N3}] \sim B[y_{N3+b1-1}]$  以及高于  $1.05U_N$  的  $b_2$  个元素  $B[y_{N3+b1}] \sim B[y_{M-1}]$ 。若  $M - \Delta N < b_2$ , 则对  $B[y_{N3+b1}] \sim B[y_{M-1}]$  进行快速排序法, 选出需切除的电容电压最高的  $\Delta N$  个子模块; 若  $b_2 < \Delta N$ , 则对  $B[y_{N3}] \sim B[y_{N3+b1-1}]$  进行快速排序法, 选出其中电容电压最高的  $\Delta N - b_2$  个子模块与  $b_2$  个元素  $B[y_{N3+b1}] \sim B[y_{M-1}]$  对应的子模块切除。

在桥臂子模块与投切个数较多的情况下采用本文基于快速排序的控制方法, 更多得依赖于程序对数据的处理而不是过多开关各个子模块, 相对于具有很高开关频率的传统均压控制方法, 本方法具有比较低的开关频率, 与高操作性与高效性。

## 4. 仿真结果分析

为验证本文所提电压均衡控制策略对计算量的优化效果, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上分别搭建了 41、201 以及 401 电平 MMC-HVDC 输电系统, 如图 6 所示, 对本文提出的基于快速排序原理的均压控制策略有效性进行验证。其中, 仿真步长为  $20 \mu s$ , 交流系统的额定电压均为 220 kV, 直流线路电压为  $\pm 200 kV$ , 传送容量为 600 MW。子模块电容值为 3000 mF, 环流电抗器电感值为 0.04 H。

以整流换流站 a 相上桥臂子模块为研究对象, 图 7 和图 8 分别为采用基于冒泡算法和本文所提算法

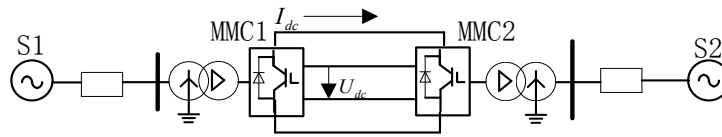


Figure 6. System construction drawing of MMC-HVDC

图 6. MMC-HVDC 系统结构图

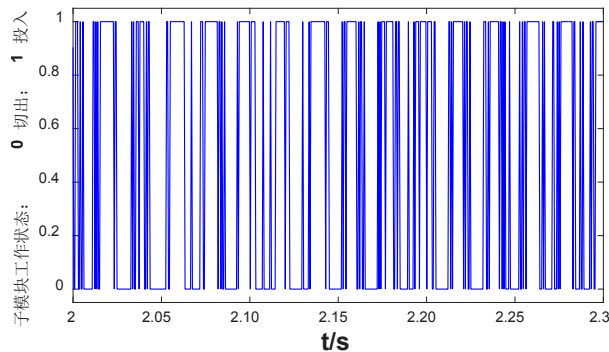
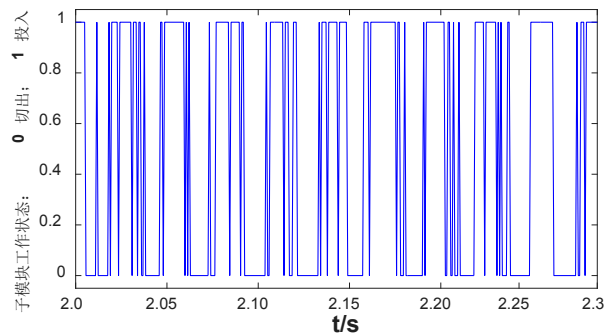


Figure 7. Switching frequency of submodules based on bubble sort algorithm

图 7. 基于冒泡算法的子模块开关频率



**Figure 8.** Switching frequency of submodules based on sort algorithm in this article

**图 8.** 基于本文算法的子模块开关频率

**Table 1.** Calculation contrast in normal conditions

**表 1.** 正常情况计算量对比

电平数	本文所提电压均衡策略		基于冒泡法的均压控制策略
	较好情况	较坏情况	
41	231	820	399.75~820
201	1526	5151	9999.75~20100
401	5551	20301	39999.75~80200

得到触发信号波形。在采用基于快速排序算法的均压策略下，子模块 IGBT 的开关次数明显得到减低。

对于桥臂子模块总数为  $n$  的 MMC，每次冒泡计算量为  $n-1$ ，算法需要执行  $n/2(n/2-1) \sim n(n-1)/2$  次比较指令[10]，本文所述的基于快速排序法的计算量与采用冒泡算法的计算量对比如表 1 所示。由表 1 可得，随着电平数的增加，本文采用的快速排序方法具有更加明显的优势。

## 5. 结论

本文提出一种基于快速排序法的改进 MMC 子模块电压均衡控制方法，以期用较小的计算量来实现子模块电容电压均衡控制。与基于冒泡法的传统排序方法相比较，本文算法针对子模块数量较多的情况，明显减小了开关频率损耗。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件上搭建了 MMC-HVDC 仿真模型，对本文所提排序算法进行验证，结果表明本文方法可以实现较小开关频率的同时，明显减小排序计算量。

## 基金项目

国家电网公司科技项目资助(XNFB-201605-FW-07)；国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600)。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-15.
- [2] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 一种新型的高压直流输电技术—MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 1-9.
- [3] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
- [4] 许建中, 赵成勇. 模块化多电平换流器电容电压优化平衡控制算法[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 256-261.
- [5] 屠卿瑞, 徐政, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.

- 
- [6] 陆翌, 王朝亮, 等. 一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 52-58.
- [7] 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 电容均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2980-2988.
- [8] Wang, L., Wang, P., Li, Z.X., *et al.* (2013) A Novel Capacitor Voltage Balancing Control Strategy for Modular Multi-level Converters (MMC). *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, 1804-1807.
- [9] 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.
- [10] 陆翌, 王朝亮, 彭茂兰, 等. 一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 52-58.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)