

DOI: 10.7667/PSPC170056

一种基于模块化多电平变换器拓扑的柔性母联控制器

王轩^{1,2}, 燕犲^{1,2}, 张怀天³, 付永生^{1,2}, 訾振宁^{1,2}, 喻劲松^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;

2. 中电普瑞科技有限公司, 北京 102200; 3. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 针对传统母联开关的各种缺陷, 提出了一种基于模块化多电平变换器拓扑的柔性母联控制器。它可以连接不同电压等级的网络, 实现潮流的优化调节、无功支撑及故障时交流系统之间的快速紧急支援和隔离故障。同时具备直流电压输出端口, 可以用于交直流混合的配电网架中。对柔性母联控制器的工作模式进行了分析, 设计了直流电压及潮流控制器。通过仿真及实验, 验证了该控制器的性能。

关键词: 母联控制器; 模块化多电平变换器; 功率控制; 电压控制

A flexible coupling switch based on modular multilevel converter topology

WANG Xuan^{1,2}, YAN Hui^{1,2}, ZHANG Huaitian³, FU Yongsheng^{1,2}, ZI Zhenning^{1,2}, YU Jinsong^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd, Beijing 102200, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For a variety of defects of the traditional coupling switch, a flexible coupling switch based on modular multilevel converter topology is proposed. It can connect the networks with different voltage levels, achieve optimal regulation of power flow, reactive power compensation, and emergency support and rapid fault isolation between fault AC system, and meanwhile has DC voltage output port which can be used in AC and DC power distribution networks. The operating mode of the flexible coupling switch is analyzed, and DC voltage and power flow controller are designed. Finally, simulation and experiment results verify the performance of the switch.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52466F160002).

Key words: coupling switch; modular multilevel converter; power flow control; voltage control

0 引言

在配电网中, 为提高供电可靠性, 需装设联络开关。考虑系统的安全稳定性, 传统的配电网无法形成高低压电磁环网, 联络开关两端的配电网电压等级必须相同, 且频率相位一致。同时传统开关无法控制两个网络之间的潮流, 功率的流向由两个网络的电源及负载情况共同决定。此外, 开关动作速度慢且自动化程度低。因此随着柔性变电站技术的引入, 未来配电网需实现高、低压交直流混联, 分布式可再生能源参与系统潮流调配, 提升新能源接纳能力, 分布式电源与系统负荷协调控制等^[1-5]。电力电子装置响应速度快, 控制灵活, 可以构成新型的柔性母联控制器, 代替传统联络开关, 成为柔性变电站中的关键组成设备, 提升电网安全稳定运

行水平和运行效率。

现阶段, 多家研究机构已针对不同控制目标, 提出了适用于配电网的多种设备: 加拿大电网的解耦互联器(DI), 在稳态情况下可实现网络间潮流互相调度, 故障情况下可以限制短路电流; 日本电网的回路功率控制器(LPC), 可实现不同交流电网的环网运行、优化馈线间潮流分布; 此外日本的环网平衡控制器(Loop Balance Controllers, LBC), 能够有效调控两端的潮流分布, 分配馈线间的负荷; 荷兰提出的能量路由器(Smart Power Router)^[6]和灵活直流联络器(Flexible DC Links)^[7], 可以加强配网组网运行的灵活性; 英国提出 Soft Normally Open Points(SNOP), 具备辐射型配电网与环网型配电网的主要优势^[8]。我国对于柔性变电站技术的研究还处于起步阶段, 相关研究较少。目前比较成熟的拓扑是采用传统背靠背的两电平 PWM 整流器。但是在配电网中, 电压等级较高, 使用两电平 PWM

整流器有比较大的局限性。

本文提出了一种基于模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 拓扑的柔性母联控制器, 有响应速度快、能频繁动作和控制连续等特点, 同时具备直流电压输出端口, 可以用于交直流混合的配电网架中。分析了柔性母联合控制器的控制策略, 设计了直流电压及潮流控制器, 最后通过仿真及实验, 验证了该控制器的性能。

1 柔性母联控制器

1.1 柔性母联控制器结构

三相 MMC 主电路拓扑结构如图 1 所示, 其中, L_S 是网侧电感, R_S 是交流侧等效电阻, N_S 是交流侧中性电位参考点。MMC 三相主电路中每一相都可分成为上、下两个桥臂, 每个桥臂由数量相同的 n 个子模块 (Sub-Module, SM) 以及桥臂电感 L_a 构成, 桥臂电感用来减小环流。每个子模块均由两个带有反并联二极管的 IGBT 和一个并联的储能电容 C_0 构成。每个桥臂上的子模块数量 n 需要根据实际电压等级和应用场合进行选择^[9-11]。

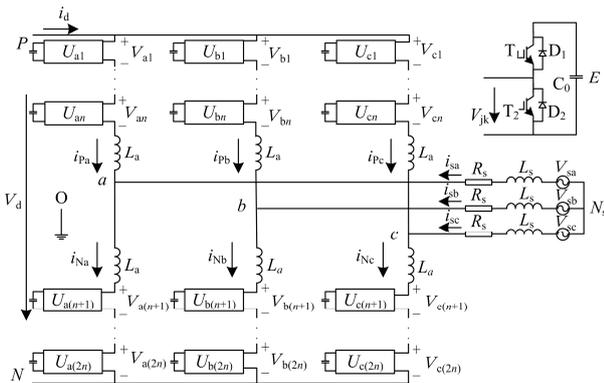


图 1 三相 MMC 电路结构拓扑图

Fig. 1 Topology structure of three-phase MMC

MMC 的子模块单元根据开关状态不同, 可输出 0、E 两种电平, 利用各个子模块的电容电压 E 来维持直流母线电压 V_{dc} , 两者关系如式(1)所示。MMC 的交流侧多电平输出可以通过合理选择主开关器件 T_1 、 T_2 的通断状态来实现。

$$E = \frac{V_{dc}}{n} \quad (1)$$

柔性母联合控制器的拓扑结构如图 2 所示, 由两个 MMC 换流器组成, 其中: L_1 和 L_2 为交流滤波电感; R_1 和 R_2 为 MMC 换流器的损耗等效电阻^[12-14]。将两个 MMC 换流器直流侧连接, 交流侧分别接不同的配电网架, 便可作为联络开关。两端的 MMC

换流器通过公共直流母线实现背靠背运行, 采用适当的控制策略可以使得直流母线上传输的功率双向可控。

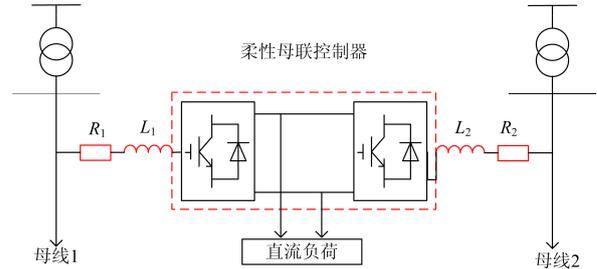


图 2 柔性母联控制器拓扑图

Fig. 2 Topology structure of flexible coupling switch

1.2 柔性母联控制器运行模式

如图 2 所示, 母线 1 和母线 2 通过柔性母联合控制器联通, 可实现双端分区运行、双端合环运行和单端供电三种运行方式。在双端分区运行方式下, 两母线分别给该侧的负荷供电, 无功率交换; 在双端合环运行方式下, 系统合环运行, 两母线间存在功率交换; 在单端供电运行方式下, 一侧母线检修或故障退出运行, 此时由另一侧母线为两侧负荷供电。柔性母联合控制器两 MMC 换流器间的公共直流母线可输出直流电压, 为直流负载供电。

2 系统控制方法

2.1 MMC 基本控制方法

调制策略是影响 MMC 输出性能的重要因素之一, 适用于 MMC 的调制方法包括空间矢量脉宽调制、载波层叠脉宽调制、阶梯波调制、载波移相脉宽调制和最近电平逼近调制等。

本文采用载波移相脉宽调制方法, 该方法具有等效开关频率高, 谐波含量低, 利于子模块电容均压控制等优点。设定一相子模块数为 $2n$, 上、下桥臂各 n 个子模块。将 $2n$ 个三角载波分别与同一个调制波进行比较, 一共生成 $2n$ 组 PWM 脉冲, 触发 $2n$ 个子模块内的功率开关器件。通过将各子模块的 PWM 脉冲叠加可以生成一个等效的多电平 PWM 脉冲波形^[15-16]。

MMC 每个子模块直流侧电容相互独立, 直流母线电压由一相上所有子模块电容电压共同支撑。实际中每个子模块充放电、开关损耗以及驱动脉冲的差异都会造成子模块电容电压不均衡, 直接影响装置输出的电能质量, 严重时甚至会危及到换流器安全运行。因此 MMC 子模块电容电压均衡是系统稳定运行的前提条件。本文使用的子模块电容电压均压控制策略如图 3 所示, 该控制策略包括桥臂间的电容电压平均控制和同一桥臂子模块间的电容电

值, 保证该侧网络所接负荷工作在额定交流电压状态下。此时需要分别控制该侧交流电压的幅值和频率, 该侧 MMC 换流器必须工作在交流孤岛模式下, 此时的控制方式为定交流电压控制。定交流电压幅值控制器的结构图如图 8 所示, 当柔性母联控制器处于三相对称运行状态下, 电网电压矢量方向选取为 d 轴方向时, $u_{sdref}=U_s$, $u_{sqref}=0$, 式中, U_s 为交流相电压峰值。

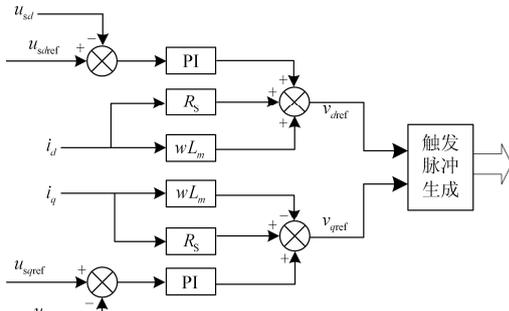


图 8 定交流电压幅值控制器

Fig. 8 AC voltage amplitude controller

当柔性母联控制器交流侧一端连接的是无源系统, 并且双侧母线是该无源系统唯一的功率来源时, 无源系统的频率需要由该侧 MMC 换流器来控制, 此时需要采用定频率控制。在这种情况下, 可以直接使该侧 MMC 换流器输出频率等于系统的额定频率 50 Hz。

3 仿真与实验验证

3.1 Matlab/Simulink 仿真

本文搭建了基于 MMC 的柔性母联控制器仿真系统, 该仿真系统由两个 MMC 换流器背靠背连接, 系统结构示意图如图 2 所示。两个 MMC 换流器的参数设置一致, 主要参数如表 1 所示。

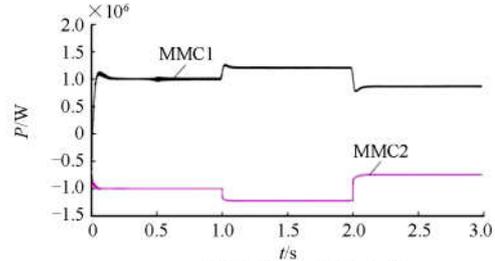
表 1 MMC 仿真系统参数

Table 1 System parameters of MMC platform

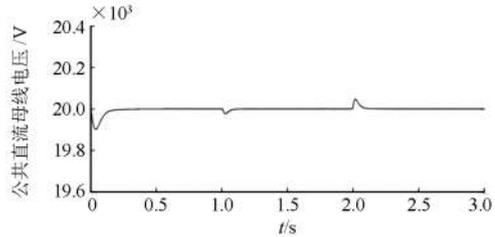
参数	取值
额定容量/MW	2
交流电压 U_{ac}/kV	10
基波频率 f_s/Hz	50
直流侧电压 U_{dc}/kV	20
网侧线路电阻 R_s/Ω	0.01
子模块电容 $C_{sm}/\mu F$	3000
桥臂电感 L_w/mH	10
桥臂子模块数 n	20
子模块电压 U_c/kV	1
网侧线路电感 L_s/mH	1
CPS-SPWM 开关频率 f_{sw}/Hz	500
等效开关频率 nf_{sw}/kHz	10

MMC 换流器控制方式和初始参数设置分别为: MMC1 为定直流电压控制, 电压指令值为 20 kV; MMC2 为定有功、无功功率控制, 有功功率指令为 -1 MW, 无功功率指令为 0 MW。

考察柔性母联控制器的潮流控制能力, 进行有功功率改变仿真。对 MMC2 进行有功功率的阶跃上升和阶跃下降仿真分析, 结果如图 9 所示。



(a) 两换流器有功功率曲线



(b) 公共直流母线电压波形

图 9 能量传输控制模式仿真结果

Fig. 9 Simulation results of energy transmission control model

其中, 图 9(a)为 MMC1 和 MMC2 的有功功率仿真波形, $t=1$ s 时, MMC2 有功功率阶跃上升为原值的 1.2 倍, 即 -1.2 MW, $t=2$ s 时, MMC2 有功功率阶跃下降为原值的 0.8 倍, 即 -0.8 MW, 突变发生后 MMC2 控制器均能在短时间内快速跟踪功率指令值并达到稳定运行状态。图 9(b)为公共直流母线电压波形, 在 MMC1 的控制下, 公共直流母线电压基本稳定在指令值 20 kV, 在功率突变时稍有波动; 由图 9(a)和图 9(b)可知, 柔性母联控制器可以自由控制两个网络间的潮流, 并保证直流供电稳定。

在电网故障孤岛供电模式下, MMC 换流器控制方式和初始参数设置分别为: MMC1 为定直流电压控制, 电压指令值为 20 kV; MMC2 为定交流电压控制, 交流电压幅值指令值为 10 kV。在 $t=0$ s 时, 负载吸收的有功功率为 1 MW, 无功功率为 0 Mvar; 在 $t=2$ s 时, 设置负载吸收的有功功率为 1.5 MW, 无功功率不变, 系统的动态响应如图 10 所示。

图 10(a)是 MMC2 功率曲线, 在负荷发生突变时, 有功功率迅速变化, 以满足负荷的功率变化, 响应速度快。图 10(b)是 MMC1 功率曲线, 由于 MMC1 以控制公共直流母线电压为目标, 功率响应

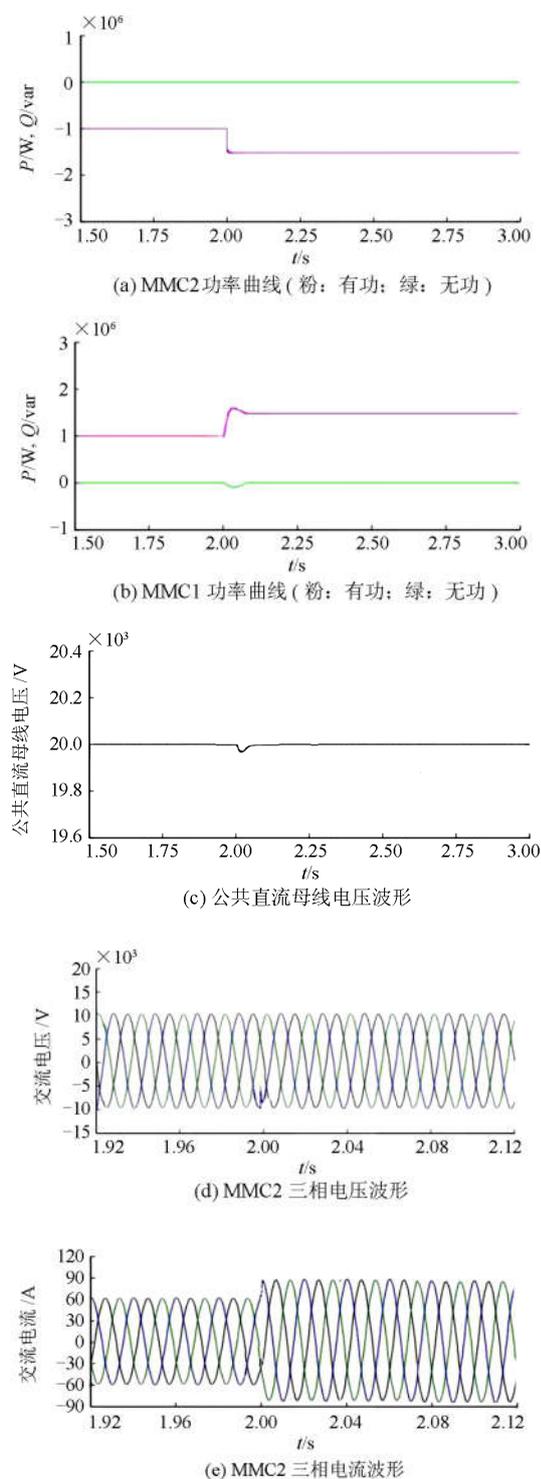


图 10 孤岛向不平衡负载供电仿真结果

Fig. 10 Simulation results of island supplying the unbalanced load power

速度略慢于 MMC2, 但总体满足功率变化。图 10(c) 是公共直流母线电压波形, 当孤岛负荷增加时, 公共直流母线电压下降, 但很快恢复到额定直流电压

20 kV, MMC1 电压控制效果明显。图 10(d)和图 10(e) 分别是 MMC2 三相交流电压和电流的仿真结果, 在负荷发生突变时, 三相电压幅值和频率基本保持不变, 三相电流幅值发生变化, 以满足负荷的功率变化, 波形正弦度很好, 总谐波畸变率 $THD < 4\%$, 电能质量较好。

3.2 半实物平台仿真

本文搭建的基于 MMC 的柔性母联控制器半实物仿真实验平台由两台 MMC 样机组成, 两台样机均为三相 5 电平的 MMC 拓扑, 每相桥臂串联 4 个子模块, 总功率为 10 kVA 的实验样机。实验平台参数如表 2 所示。

表 2 实验平台参数

Table 2 Parameters of experimental platform

参数	数值
额定容量/kVA	10
直流侧额定电压/V	120
交流侧额定线电压有效值/V	60
交流侧滤波电感/mH	5
桥臂电感/mH	5
子模块电容容值/ μF	2000
桥臂子模块数 N	4
载波频率/kHz	2

对系统进行有功电流突变实验, 设置参数如下: 样机 1 和 2 的交流侧电压均为 60 V, 样机 1 的直流侧电压指令值为 120 V, 令样机 2 的有功电流指令值由 0 突变为 4 A, 再由 4 A 突变为 0。实验波形如图 11 所示。

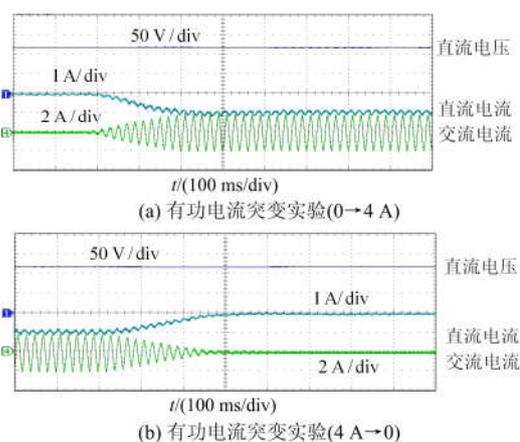


图 11 柔性母联控制器有功电流突变实验

Fig. 11 Active current mutation experiment of flexible coupling switch

从图 11 可以看出, 直流侧电流与交流侧电流动态响应迅速, 且无较大超调, 交流电流波形正弦度

很好, 电能质量较好, 达到了能量传输控制效果。

在孤岛供电模式下, 对系统进行交流侧负载突变实验, 设置参数如下: 样机 1 的交流侧电压为 60 V, 直流侧电压指令值为 120 V; 样机 2 的交流侧电压指令值为 50 V, 交流侧连接三相对称负载。实验波形如图 12 所示。

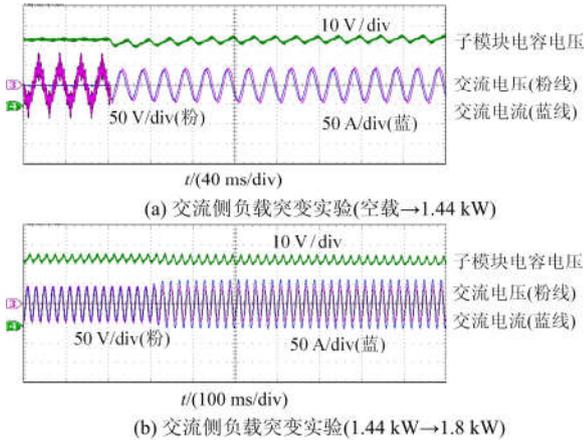


图 12 柔性母联控制器交流侧负载突变实验

Fig. 12 AC load mutation experiment of flexible coupling switch

从图 12 可以看出, 当 MMC 样机 2 交流侧由空载变为负载 1.44 kW 时, 交流侧电压波形谐波含量变小, 交流电流则由 0 平缓上升到 5A; 在负载由 1.44 kW 突变为 1.8 kW 瞬间, 交流电压保持恒定, 交流电流响应迅速, 并很快达到稳定状态。

4 结论

本文分析了柔性母联控制器的拓扑结构及工作模式, 设计了直流电压及潮流控制器, 最后通过仿真及实验, 验证了该控制器的性能。

基于 MMC 的柔性母联控制器具有高度模块化的结构, 可以根据用户的需求自定义模块数量, 满足不同电压等级的要求, 方便系统扩容, 同时冗余度高, 大大提高了系统的可靠性; 具有公共直流母线, 使得 MMC 可以背靠背运行, 采用适当的控制策略即可完成功率的双向可控; 相比于传统的 PWM 换流器, MMC 换流器对主回路上电感电容参数要求不高, 只需要使用普通电缆即可实现所有功率单元间的可靠连接, 可实现普适的工程应用; MMC 中器件开关频率低, 使得开关损耗降低, 多个子模块级联使得 MMC 的等效开关频率较高, 这样就降低了谐波含量和电磁干扰, 提高了电能质量。

柔性母联控制器应用于柔性变电站, 可以实现系统潮流的有效控制、电能质量的有效控制、大规模交直流负荷混供以及分布式电源、储能、多元化

负荷的高效接入和协调控制, 对于柔性变电站的发展起到重要作用。

参考文献

- [1] 孔涛, 程浩忠, 李钢, 等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 92-99.
KONG Tao, CHENG Haozhong, LI Gang, et al. Review of power distribution network planning[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 92-99.
- [2] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [3] 邢海军, 程浩忠, 张沈习, 等. 主动配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2705-2710.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Shenxi, et al. Review of active distribution network planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2710.
- [4] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 203-213.
XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 203-213.
- [5] 范士雄, 蒲天骄, 刘广一, 等. 主动配电网中分布式发电系统接入技术及其进展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 92-101.
FAN Shixiong, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Technologies and its trends of grid integration of distributed generation in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 92-101.
- [6] NGUYEN P H, KLING W L, RIBEIRO P F. Smart power router: a flexible agent-based converter interface in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 487-495.
- [7] ROMERO-RAMOS E, GOMEZ-EXPOSITO A, MARANO-MARCOLINI A, et al. Assessing the loadability of active distribution networks in the presence of DC controllable links[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(11): 1105-1113.
- [8] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, providence, USA: 1-8.
- [9] DEBNATH S, QIN J, BAHRANI B, et al. Operation,

- control, applications of the modular multilevel converter[J]. A review, IEEE Trans, Power Electron, 2015, 30(1): 37-53.
- [10] 代高富, 赵丹, 林鹏峰, 等. 基于 MMC 拓扑的有源滤波器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 74-80.
DAI Gaofu, ZHAO Dan, LIN Pengfeng, et al. Study of control strategy for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 74-80.
- [11] 伍小杰, 杨超, 公铮, 等. 基于多谐振控制器的 MMC 简化环流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 74-81.
WU Xiaojie, YANG Chao, GONG Zheng, et al. Simplified circulating current suppressing strategy for MMC based on multi-resonant controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 74-81.
- [12] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [13] 周阳, 常非. MMC 电磁暂态快速仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 1-8.
ZHOU Yang, CHANG Fei. Quick model of MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 1-8.
- [14] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [15] YUAN Yubo, LI Peng, KONG Xiangping, et al. Harmonic influence analysis of unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2016, 4(1): 10-18.
- [16] 孙浩, 杨晓峰, 支刚, 等. CPS-SPWM 在模块组合多电平变换器中的应用[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 131-136.
SUN Hao, YANG Xiaofeng, ZHI Gang, et al. Application of carrier phase-shifted SPWM in the modular multilevel converter[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 35(5): 131-136.
- [17] 李笑倩, 宋强, 刘文华, 等. 采用载波移相调制的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 49-55.
LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Capacitor voltage balancing control by using carrier phase-shift modulation of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 49-55.
- [18] 杨晓峰, 郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 59-65.
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65.

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-22

作者简介:

王 轩(1978—), 男, 高工, 研究方向为电力系统和电力电子技术等;

燕 犁(1978—), 男, 高工, 研究方向为电力系统和电力电子技术等;

张怀天(1994—), 女, 硕士, 研究方向为新能源和电力电子技术等。

(编辑 葛艳娜)