

基于VSC的三端柔性直流输电系统的动模实验平台设计

李飞 李咸善 李振兴 赵平

梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北省 宜昌市 443002

Design of Three Terminal Flexible DC Transmission System Experimental Platform Based on VSC

LI Fei, LI Xianshan, LI Zhenxing, ZHAO Ping

Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002

ABSTRACT: Dynamic simulation experiment of power system provides practical reference for actual operation of power system. Most of the traditional dynamic model machines are based on AC transmission system, that can't simulate the operation characteristics of actual flexible DC Transmission System. This paper introduces a flexible DC transmission system based on three-terminal VSC, which integrates the two-level, three-level and multilevel VSC (voltage source converter) system, and its open topology structure can adapt to various operation modes of modern flexible DC system. At the same time, the control and protection, experimental design, experimental verification and other aspects of the system are also studied in this paper, and the dynamic model experiment of the steady-state and fault parts of the system is completed, which provides a broad platform for the experimental teaching research, engineering promotion and new equipment verification of the system.

KEY WORD: Flexible DC transmission, dynamic simulation, modular multilevel converter, experimental platform

摘要: 电力系统动模实验为实际的电力系统运行提供了实践参考, 而传统的动模样机大多以交流输电系统为主, 无法模拟实际柔性直流输电系统的运行特点。本文引入了基于三端VSC的柔性直流输电系统的结构, 其融合了二电平、三电平和多电平的VSC(电压源型换流器)系统, 其开放性的拓扑结构可适应现代柔性直流系统的多种运行方式。同时, 本文对柔直系统的控制与保护、实验设计、实验验证等各方面也展开了研究, 并对柔直系统的稳态及故障部分开展了动模实验, 为实际柔直系统的实验教学研究、工程推广及新型设备验证提供了广阔的平台。

关键词: 柔性直流输电, 动模, 模块化多电平换流器, 实验平台

1 引言

物理模拟和数字仿真是进行电力系统模型试验的主要方法^[1]。数字仿真的核心是利用数学方法进行分析, 而物理模拟的重点是采用物理方法来研究的。

与数字仿真相比, 物理模拟能够直接观察到现象的物理过程^[2], 物理模拟的意义主要是能够探究现象的本质及其变化的根本规律, 特别是针对某些不能完全用数学方程式描述的问题和物理现象尤为适用。同时, 物理模拟可以验证电力系统的基本假设、基本理论和数学表达式, 进而简化和完善电力系统理论^[3]。

电力系统动模则利用相似原理, 搭建与实际

电力系统设备参数标么值一致的物理模型^[4]。目前, 很多科研单位和高校都已开展了动模研究, 中国电科院、华中科技大学、华北电力大学、湖南大学等等相继建成了动模实验室及控制平台^[5-7]。各动模平台系统均配置有无穷大电源、模拟常规发电机组、模拟交流负荷、模拟交流线路等, 其中: 部分动模样机配置有新能源机组、柔性输电装置等。在动模平台上可以开展运行方式切换、潮流控制、电气故障模拟、参数测试、稳定性试验等等, 为实际的电力系统运行与控制及新产品测试提供方便的运行环境^[8-9]。

但现有的动模系统大多是基于交流输电的平台, 柔性直流动模平台比较薄弱。在此背景下,

本文考虑的柔性直流输电系统动模平台包含了两端、三端和多端VSC系统，通过改变其拓扑结构可以适应多种运行方式，并从系统结构设计、控制系统设计、保护系统设计、实验设计和验证等各方面展开了研究，对柔直系统工程的科学研究、产品验证、工程推广提供了试验平台。

2 柔性直流系统结构设计

2.1 直流系统架构

三端柔性直流输电系统的示意图如图1所示^[10]，该系统是由一台二电平换流器、一台二极管钳位型的三电平换流器(MMC)和一个含有两台同步发电机的交流系统组成。三组换流器并联运行，直流母线电压设置为700V。三台换流器的交流侧就近接于同步发电机旁边，为交流系统提供无功功率，降低同步发电机的无功功率输出，提升同步发电机的功率因数，从而提升交流线路中的电压，保证交流电压位于额定值附近，进一步提升交流系统的电能质量。

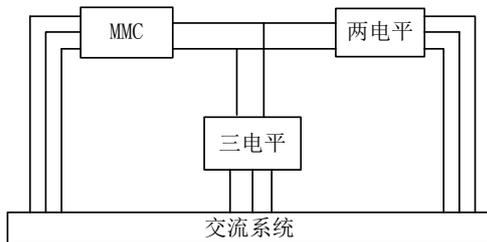


图1 三端柔性直流系统

Fig.1 Three terminal flexible DC system

不同电平换流器反馈到交流系统的电压质量都不一样，其中，多电平控制器最多可以输出36电平，控制性能最好，图1中各设备参数如表1、表2和表3所示。

表1 系统的基本参数

Tab.1 Basic parameters of the system

同步发电机端电压	直流母线电压	交流负荷	交流负荷电压
0.38kV	0.7 kV	2.5kW+1k var	0.22kV
交流系统中变压器			
额定容量	电压比	漏抗	
15kVA	0.38 kV/0.8kV	0.13pu	

表2 MMC的基本参数

Tab.2 Basic parameters of MMC

限流电阻	子模块直流电容值	桥臂电感	子模块个数(不含冗余)
100Ω	3800μF	0.0268mH	24

换流变压器		
额定容量	电压比	漏抗
7.5kVA	0.8kV/0.46kV	0.15pu

表3 二电平和三电平换流器的基本参数

Tab.3 Basic parameters of two-level and three-level converters

限流电阻	直流侧电容	网侧电感	滤波电感
100Ω	880μF	0.0233mH	0.0466 mH
换流变压器			
额定容量	电压比	漏抗	
7.5kVA	0.8kV/0.46kV	0.15pu	

2.2 平台优势及实验设计

基于三端VSC的柔性直流输电系统如图2所示，图中须设置一个换流站作为主站来控制电压，其它换流站可以设置为从站来调节功率^[11]。任意一个换流站均可设置为主站，采用定直流电压和无功功率模式；其它两换流站设置为从站，采用为定有功功率和无功功率模式。

柔性直流系统大多为电力电子器件，其承受过电压、过电流的能力比较弱，其动态性能也较复杂，如果直接采用实际的柔直系统开展实验，其成本太高，且不易维护，而通过搭建典型的动模平台，用实际的物理模拟的代替数字仿真，不仅切合工程实际，实验数据也具备说服力，同时可模拟实际柔直系统的各种运行方式及特性实验。可开展的实验如下：

(1) 各种运行方式的模拟。直流线路可以进行星三角变换改变网络参数，同时通过控制各换流站直流侧的开关实现三端柔直系统向两端柔直系统的转换，以适应实际工程中的各种拓扑结构^[12]。

(2) 基础实验操作模拟

1) 换流站的开停机实验。多台换流站同时启动会给整个输电系统带来很大的电压和电流冲击，这就需要确定换流站的启动方式和启动顺序来减小电压和电流的冲击。

系统开机过程主要有以下四个步骤：MMC、二电平、三电平设备依次上电；各换流站交流侧开关合闸；换流站直流侧开关合闸；启动各换流站上位机系统。

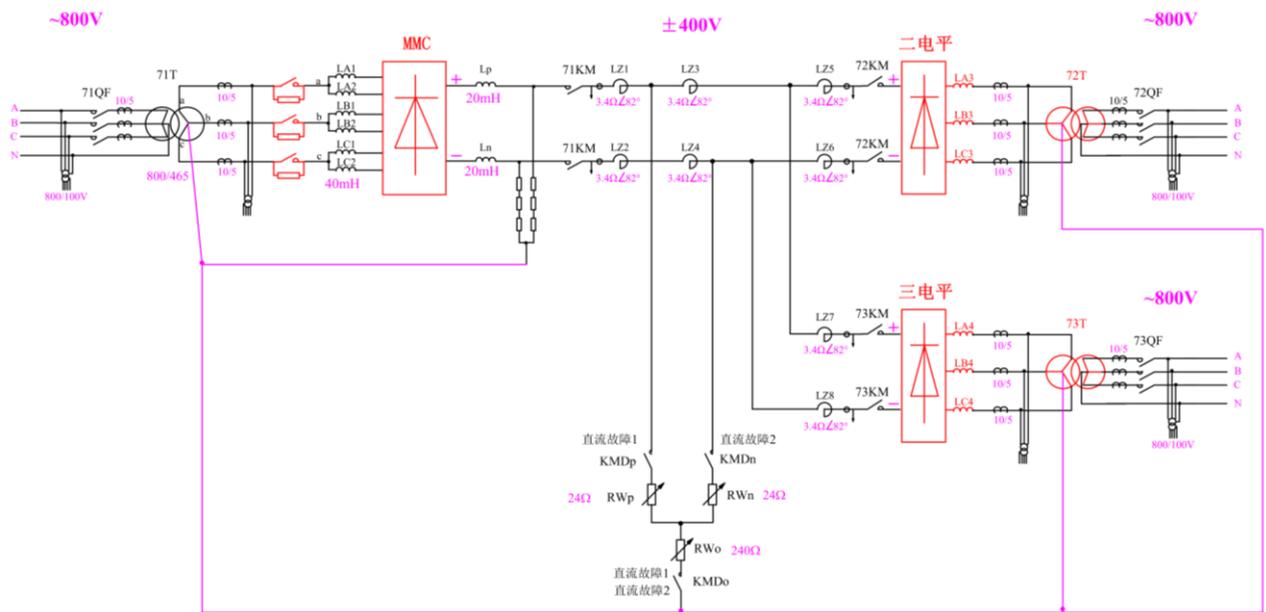


图 2 基于 VSC 的三端柔性直流系统图

Fig.2 Three Terminal Flexible DC Transmission System diagram based on VSC

2) 电压控制、潮流控制实验。首先通过主站设置为定直流电压和定无功功率调节模式，确定运行电压水平和无功功率的大小及方向，从站设置为功率输出模式，通过不断调节从站功率大小和方向，以适应交流系统功率传输的要求。

(3) 故障模拟^[13-14]

1) 直流线路单极、极间故障实验：用于测试柔直系统故障后的暂态性能；

2) 换流器故障：子模块过温、过压、欠压、IGBT故障及通信故障；

3) 控制系统故障：站级控制器与阀基控制器通信故障，阀基控制器与子模块控制器通信故障。

3 MMC 站级控制器设计

3.1 MMC 站级控制器基本功能

MMC换流站控制系统分为上位机控制系统、站级控制保护系统、阀基控制器以及子模块控制器（如图3所示）^[15-16]。

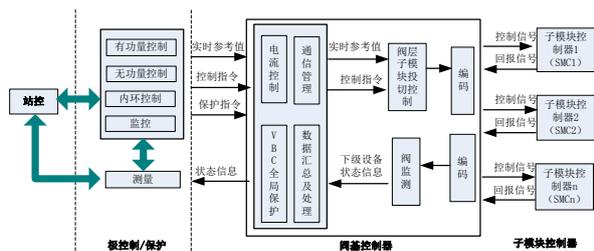


图 3 控制系统分层式结构

Fig.3 Hierarchical structure of control system

上位机控制相当于系统后台监控，主要是完成电气一次系统的电气量显示，保护告警动作信号显示及功率参考值的设置等。

站级控制系统完成电气一次系统的电气量的采集，通过比较设定的功率参考值，对实际的功率量进行调节，调节信号通过调制比M和移相角 δ 体现，输出信号为正弦参考波。

阀基控制器接收站级控制系统的信号，即正弦参考波，根据环流抑制策略及电容电压平衡策略，给予模块输出触发脉冲。

子模块控制器接收阀基控制器输出触发脉冲信号，完成对MMC换流站各设备的控制与保护。

3.2 MMC 保护策略

在MMC站级控制中，处理器通过比较换流站采集到的交流侧电气量与设定值之间的偏差，实现电气量超限保护，其功能由站级控制的中断系统实现。中断系统设置了若连续两次采集的电气量均超限则触发保护动作，有效的避免了采样失真和防止保护误动作。

多端柔性直流输电系统的单个换流站的主接线图如图2所示，其中直流保护对象主要包括充电电阻、桥臂电抗器、换流阀及直流平波电抗器及直流电缆。保护具体配置如表2所示。

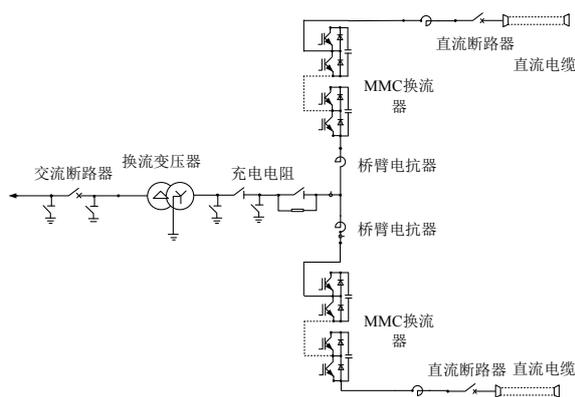
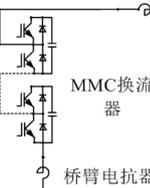


图4 单个换流站主接线图

Fig.4 the main wiring diagram of single converter station

表4 直流保护的配置

Tab.4 the configuration of DC protection

序号	保护功能项	保护的区域
1	启动回路差动保护	
2	交流连接母线过流保护	
3	交流低电压保护	
4	交流过电压保护	
5	交流连接母线接地保护	
6	启动回路热过载保护	
7	桥臂差动保护	
8	桥臂过流保护	
9	阀直流差动保护	
10	阀直流过流保护	
11	桥臂电抗器差动保护	

12	桥臂电抗器谐波保护	
13	直流线路差动保护	
14	直流低电压保护	
15	直流过电压保护	
16	直流场区接地过流保护	
17	交直流碰线保护	

4 实验分析

4.1 实验样机

实验样机接线如图4所示，三端柔性直流系统包括三个换流站，分别是二电平、三电平和多电平MMC站（其参数见表1~表3所示），71KM、72KM、73KM为直流侧开关，交流电源侧设置有调压器08TU，用来测试系统在不同电压下的运行工况，08QF、71QF~73QF及41QF~44QF均为交流系统开关，三端柔直系统含两路交流电源，一路取自380V市电作为无穷大系统，另一路电源取自模拟核能机组，机组容量15kVA，机端电压380V，三电平换流站的交流侧母线接入7.5kVA可调节的电动机负荷。其中，MMC变换器的各桥臂与36个MMC子模块相连，包括4个热备用子模块，开关器件采用IGBT半导体元件。

换流器的额定功率是 7.5kW，交流输入为 0.51kV。交流电压基准值 $U_B=0.416kV$ ，交流侧电流基准值 $I_B=0.012kA$ ，系统容量的基准值 $S_B=7.5kVA$ ，直流电压基准值 $U_{dc}=1kV$ 。

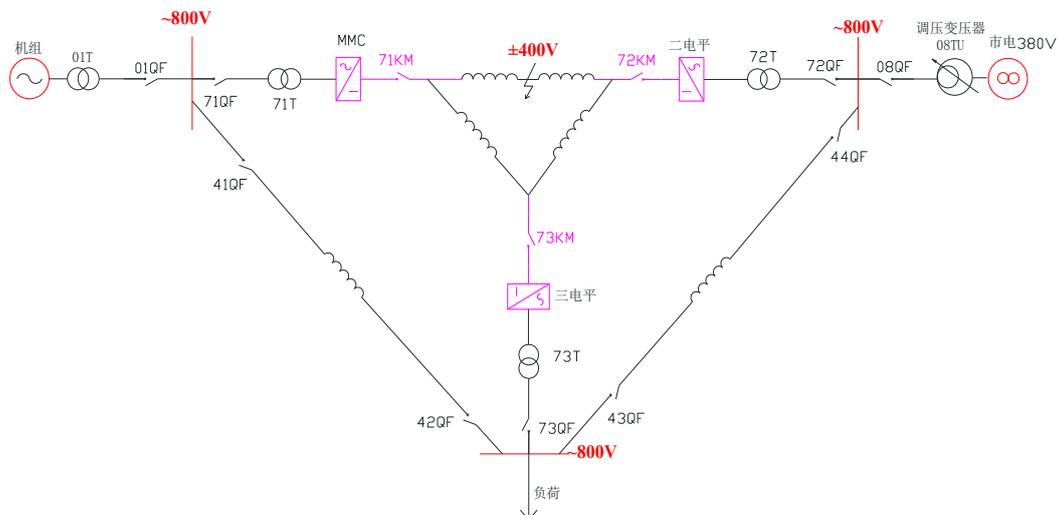


图5 动模实验样机柔性直流一次接线图

Fig5 Flexible DC main wiring diagram of dynamic model experimental prototype

将MMC网侧交流电压值调整为800V附近(不超过800V)，MMC阀侧直流电压设定为450V，直

流侧负载电阻 300Ω ，交流侧电流与直流侧电流的比值 0.816 ，各换流站的变流器采用统一参数，电流变送器和电压变送器的变比分别为 $10A/4V$ 、 $1000V/5V$ 。MMC换流站设置为定直流电压模式，二电平、三电平换流站均设置为定功率模式。

4.2 三端柔性直流系统动模实验

正常运行时，MMC换流站直流侧电流为 $1.5A$ ，换算到采样互感器二次侧的直流电流为 $600mA$ ，交流侧电流有效值约为 $490mA$ ；二电平换流站直流侧互感器二次侧的电流为 $200mA$ ，交流侧电流有效值约为 $163mA$ ；三电平换流站直流侧互感器二次侧的电流为 $400mA$ ，交流侧电流有效值约为 $326mA$ 。由RIGOL示波器记录CSV数据形成的各换流站稳态电流时域变化曲线如图6、图8和图10所示。 $t=0.06s$ 时，在三端VSC柔直系统的直流侧设置了双极故障，故障持续大约 $0.03s$ 后，故障被隔离，故障前后三端柔直系统各换流站的暂态波形如图7、图9和图11所示。

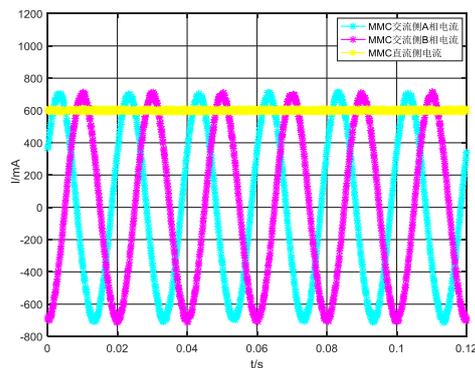


图 6 MMC 稳态输出波形
Fig.6 Steady state waveform of MMC

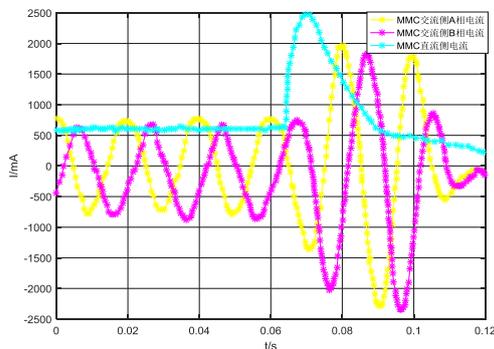


图 7 MMC 直流侧短路后暂态波形
Fig.7 Transient waveform of setting DC side short of MMC

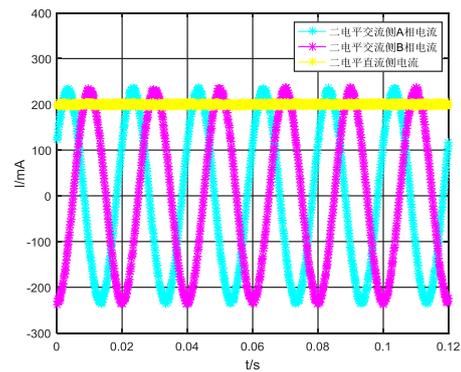


图 8 二电平换流站稳态输出波形

Fig.8 Steady state waveform of two level converter station

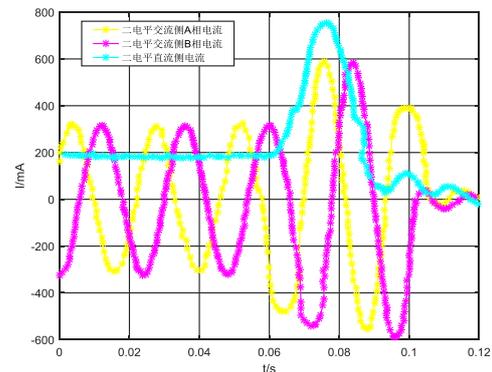


图 9 二电平换流站直流侧短路后暂态波形

Fig.9 Transient waveform of setting DC side short circuit of two level converter station

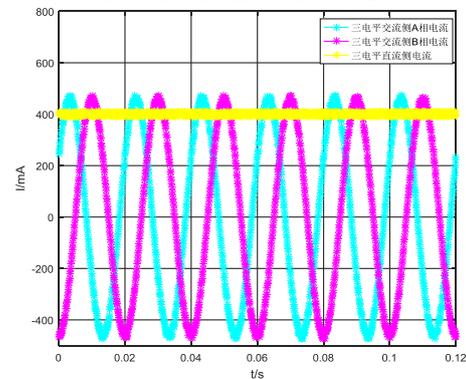


图 10 三电平换流站稳态输出波形

Fig.10 Steady state waveform of three level converter station

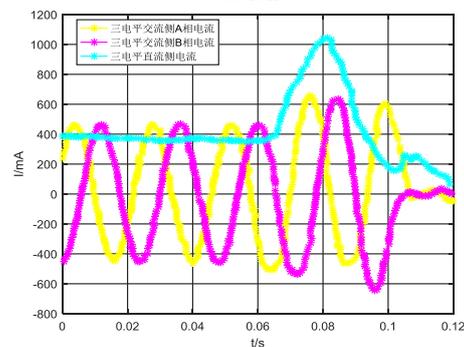


图 11 三电平换流站直流侧短路后暂态波形

Fig.11 Transient waveform of setting DC side short circuit of three level converter station

从图6、图8和图10的稳态波形可见，稳态运行时，各换流站均能保持稳定运行，电流波形维持在正常水平，直流侧电流波形基本恒定，交流侧电流波形为正弦波。

在直流侧设置双极短路后，由图7、图9和图11的暂态波形可见，直流侧电流随着交流侧电流的变化逐步上升，各换流站均产生过电流信号，随后，直流线路差动保护动作跳开线路各侧断路器，完成故障的有效隔离；从暂态波形的曲线来看，故障期间，直流侧电流逐步升高，交流侧正弦波的幅值也相应增大，但谐波含量较少，故障切除后，直流侧和交流侧电流下降，相比较于二电平和三电平换流站直流侧波形，MMC侧直流电流波形平稳，波形较为理想。

5 结论

本文讨论了三端VSC的柔性直流输电系统平台的架构设计、控制保护设计等，并以实际的动模样机为例，对基于三端VSC的柔性直流系统各种典型工况下的特性开展了验证性实验，体现了各换流站在稳态及故障时的运行特性，这对于交直流混合输电系统实验教学、科研成果验证、产品验证、工程推广等各方面都有一定的参考价值。

致谢

本文研究工作得到了中国国家自然科学基金（No. 52077120）和中国湖北省自然科学基金（No.2016CFA097）的支持。李咸善，李飞是第一作者，这些作者同样为这项工作做出了贡献。

参 考 文 献

- [1] 陈磊, 闵勇, 叶骏等. 数字物理混合仿真系统的建模及理论分析 (一) 系统结构与模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 9-13.
- [2] 刘栋, 汤广福, 贺之渊等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(02): 68-73+80.
- [3] 孙银锋. 柔性直流输电系统建模及小干扰稳定性研究[D]. 华北电力大学(北京), 2017.
- [4] 罗程, 赵成勇, 张宝顺等. 基于 MMC 的柔性直流输电站级控制器的设计及其动模实验[J]. 现代电力, 2015, 32 (2): 64-69.
- [5] 寇龙泽, 刘栋, 谷怀广等. 厦门柔性直流输电工程动模试验与数字仿真[J]. 智能电网, 2016, 4 (3): 243-249.
- [6] 宋建强, 黄永瑞, 孟学磊等. 特高压直流输电阀控动模试验系统设计[J]. 电力建设, 2015, 36 (4): 64-69.
- [7] 徐植, 基于动模实验平台的上位机软件研究与开发[D]. 广西大学, 2017.
- [8] 赵倩, 张群, 严兵等. 柔性直流输电系统控制策略及动模试验[J]. 电力建设, 2015, 36 (12): 57-62.
- [9] 杜远卓, 智能变电站动模测试方法研究[D]. 沈阳工程学院, 2016.
- [10] 梁君君, 夏成军, 李创煌等. 基于 MMC 的三端柔性直流输电系统建模与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 78-83+90.

- [11] 郑荣进, 余晓鸿, 熊玮等. 基于电压源型换流器的三端直流输电系统控制仿真研究[J]. 华中电力, 2011, 24(02): 32-35.
- [12] 唐立, 袁旭峰, 李宁等. 具有直流故障电流阻断能力的 MMC 子模块拓扑结构研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(05): 31-39.
- [13] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (15): 140-145.
- [14] Jin Yang, John E. Fletcher, John O'Reilly. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [15] 靳幸福, 宋国兵, 徐海洋, 等. 利用模量模型识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (10): 100-105.
- [16] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (19): 64-68.

收稿日期:

作者简介:

李飞, 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事电力系统运行与控制、水电站运行与仿真领域的研究。