

云南大理光伏 ± 30 kV 柔性直流输电工程 过电压与绝缘配合研究

陈卓, 蒋艾町, 梁亚博, 夏雪

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:为合理确定 ± 30 kV 低压柔性直流输电工程设备的绝缘水平和配置避雷器, 基于云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程, 利用 PSCAD/EMTDC 对工程换流站的暂态过电压进行了计算, 并根据计算结果进行绝缘配合研究。研究结果对工程换流站设备的选型和制造具有指导意义, 也为低压柔直输电工程的建设提供了参考依据。

关键词: 低压柔性直流输电; ± 30 kV; 换流站; 过电压计算; 绝缘配合

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)01-0014-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210104

Research on Overvoltage and Insulation Coordination for Converter Station of ± 30 kV Flexible DC Transmission Project in Dali of Yunnan

Chen Zhuo, Jiang Aiting, Liang Yabo, Xia Xue

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: In order to decide the insulation level of the equipment in converter station of ± 30 kV flexible low voltage DC transmission project reasonably and configure the lightning arresters, based on ± 30 kV flexible DC project of Dali photovoltaic boost in Yunnan, the transient overvoltage of converter station is calculated with PSCAD/EMTDC. According to the calculation results, the insulation coordination is studied. The research results have a significance on guiding the type selection and manufacturing of converter station equipment, and also provide a reference for the construction of flexible low voltage direct transmission project.

Key words: flexible low voltage DC transmission; ± 30 kV; converter station; overvoltage calculation; insulation coordination

0 引言

近年来,随着清洁能源的不断开发与利用,基于风电、光伏等可再生能源的并网技术受到了广泛的研究与实践^[1-3]。柔性直流输电技术,基于电压源型变流器,应用先进的电力电子器件与 PWM 脉宽调制技术,克服了传统直流输电方法存在换相失败风险、谐波水平较高和需要无功补偿等诸多缺点,为风电、光伏等新能源并网提供了更加灵活、可靠的输电方式^[4-7]。

早期的柔性直流输电技术多采用两电平和三电平的拓扑结构,但这种结构开关损耗较高、均压困难,且由于电平数较少,输出电压谐波含量高^[8-9],因此,学者们提出了模块化多电平换流器(modular

multilevel converter, MMC)。与传统的两电平和三电平拓扑换流器相比,MMC 易于扩展,输出电压谐波小、直流输电系统效率高,且能够降低系统的输电损耗^[10-12]。

国内最早建成投运的 MMC 柔性直流输电工程是上海南汇风电柔性直流输电工程,该工程实现了风电场的接入并网。此外,国内目前还建设有广东南澳、浙江舟山和福建厦门柔性直流工程,都是基于 MMC 的柔性直流输电工程^[8-9]。

对于柔性直流输电工程,系统的过电压计算与绝缘配合研究是不可缺少的一项内容,其不仅为避雷器的配置提供了参考依据,也为合理选择换流站电气设备的绝缘水平提供了指导,有助于实现工程设计经济合理的目标,维护系统的安全稳定运行^[13-15]。

目前国内对于直流输电工程的过电压与绝缘配合研究主要集中在特高压直流换流站。然而,与传统直流输电不同,柔性直流输电技术由于受电力电子器件影响,输送容量较低,选取绝缘裕度时需考虑容量的降低,以实现系统的经济型和与合理性^[13]。文献[14-15]分别研究了±200 kV和±320 kV的高压大容量柔性直流工程换流站的绝缘配合;但对于低压柔性直流输电工程,由于输电等级更低,输送容量更小,过电压水平会发生变化,其避雷器的配置和绝缘水平设计也会有所改变。因此,为了工程的经济性与合理性,有必要对±30 kV 低压柔性直流输电工程的过电压水平和绝缘配合进行研究。

云南大理光伏升压±30 kV 柔性直流工程采用基于MMC的柔性直流输电技术,通过直流电缆将光伏发电接入电网,是国内第一个光伏接入的低压柔性直流输电工程。下面基于云南大理光伏升压±30 kV 柔性直流工程,利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建了系统的仿真模型,并对系统过电压进行了计算,同时根据过电压计算结果对系统进行了避雷器配置和绝缘配合研究。研究结果对低压柔直换流站设备的选型和制造具有指导意义,为可再生能源接入的低压柔直输电工程换流站过电压计算与绝缘配合研究提供了参考依据。

1 工程概况及系统运行参数

1.1 工程概况

云南大理光伏升压±30 kV 柔性直流工程是国家重点研发计划项目“大型光伏电站直流升压汇集接入关键技术及设备研制”的配套工程。工程基于柔性直流输电技术,计划由大理市干塘子光伏电站经过直流汇集升压和DC/DC变换将直流电压提升至±30 kV,通过600 m长的直流电缆线路输送至MMC换流站,再经过换流站接入35 kV交流系统,系统接入方案如图1所示。该工程既示范了低压柔性直流电网输电技术的应用,同时解决了大理州地区可再生能源送出与消纳问题。

1.2 系统运行参数

该工程基于MMC的柔性直流输电技术,输送容量为5 MW,直流输送电压等级为±30 kV,交流侧电压等级为35 kV。工程换流站采用单极对称接线形式,联络变压器采用11型双绕组无励磁调压变

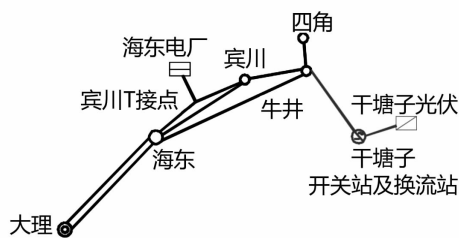


图1 系统接入方案

压器,容量为 1×6300 kVA,变压器抽头选择为 $38.5 \pm 2 \times 2.5\% / 35$ kV,阻抗电压为8%。桥臂电抗器电感值为156 mH。

直流输电线路选用电力电缆直埋方式,由于工程直流线路距离较短,因此直接利用MMC换流站对侧光伏电站接地,为直流系统提供直流零电位参考点。

2 工程过电压计算

柔性直流输电系统换流站由于整流和逆变的需要,存在着大量的非线性元件,这些元件在发生短路故障时容易引起过电压的问题,危害换流站甚至整个直流系统的安全稳定运行^[14]。因此,研究系统暂态过电压的特性,为输电系统合理配置避雷器、确定设备的绝缘水平提供参考依据,不仅可以节约设备制造成本,实现工程的经济设计,也有助于工程系统的安全稳定运行^[16-17]。

在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件中搭建了如图2所示拓扑结构的大理光伏升压±30 kV 柔性直流输电系统仿真模型,其中工程直流侧光伏组件出力为5 MW,系统直流电压为±30 kV,4个DC/DC直流变换器的容量分别为1.5 MW、1.5 MW、1 MW、1 MW,其中1.5 MW回路直流升压装置由3个500 kW的DC/DC升压模块串联,每个模块输出电压为 $DC \pm 10$ kV;1 MW回路直流升压装置由1个1 MW DC/DC升压模块构成,4个DC/DC直流变换器采用输出并联的接线方式汇集并网。MPPT控制采用电导增量法,以实现光能的最大利用。工程换流站换流阀桥臂采用36个全桥子模块和36个半桥子模块串联的混合结构,桥臂电感为0.156 H,子模块电容为1260 μ F。交流侧通过换流变压器与35 kV交流系统相连。换流阀模块采用定直流电压控制,控制极间直流电压为60 kV。交路系统则采用两点等值法进行等值处理。

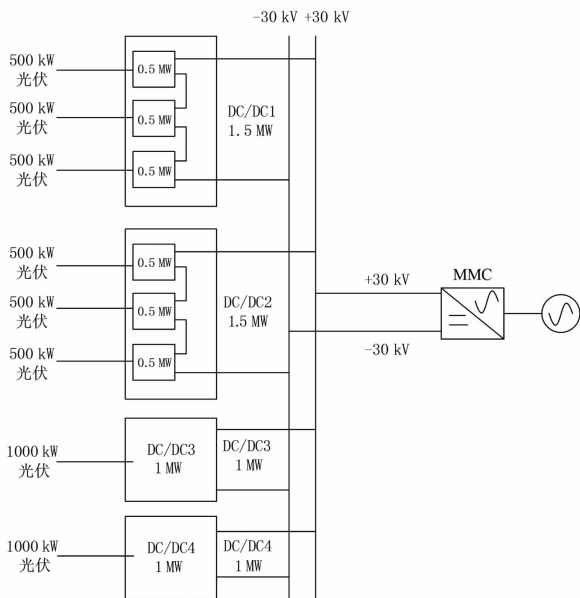


图2 大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流系统拓扑结构

下面将通过仿真,全面计算分析工程系统发生故障时交流侧与直流侧的暂态过电压,包括交流侧的雷击过电压、交流输电线路发生不对称接地故障时的工频过电压和短路故障时的操作过电压,与直流侧的直流电缆外绝缘故障时的过电压以及交流断路器动作换流阀两侧过电压。由于云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程直流侧线路采用的是电缆直埋敷设方式,故直流场电气设备不考虑雷电过电压的问题。

2.1 交流侧暂态过电压

2.1.1 雷电过电压

对于低电压等级的换流站或者变电站,由于建设水平不高、绝缘水平不理想等缺点,因雷击导致的跳闸、绝缘子闪络等故障停电成为降低工程安全可靠运行的主要因素之一^[18-19]。同时,低电压等级系统的工频过电压与操作过电压水平往往较低,因此换流站交流侧的雷电过电压水平是工程设计关注的重点,也是系统避雷器配置与绝缘配合的主要参考依据。

根据文献[20-21]中介绍的雷电流、杆塔、绝缘子以及换流站设备的数学等效模型搭建方法,在PSCAD中搭建换流站的雷电过电压仿真模型,包括交流场进线段1~2 km输电线路模型和主要电气设备的电磁暂态仿真模型,如图3所示,以研究系统在雷电绕击和反击工况下的过电压水平。其中,雷电流幅值根据换流站所处地区雷电流幅值分布概率确定,其数学模型采用双指数函数模型^[20];杆塔杆头

绝缘子闪络的判定采用规程法,即绝缘子串两端出现的过电压超过绝缘的50%放电电压即判为闪络^[22],该工程选用的绝缘子的50%放电电压约350 kV,因此将闪络电压设为350 kV。

图4为系统分别在雷电绕击和反击工况下故障相绝缘子两端的电压水平。由图可知,当发生雷电流绕击情况时,绝缘子两端电压达到378 kV,绝缘子出现闪络;当发生雷电流反击情况时,绝缘子两端电压达到444 kV,绝缘子出现闪络。

因此,可以看出,如果不装设避雷器,绝缘子会出现闪络情况,交流场各设备的过电压值远大于设备的绝缘水平,对设备绝缘和系统运行造成十分严重的影响。

2.1.2 不对称接地故障时的工频过电压

以水平年夏季最大运行方式为研究方式,利用搭建的仿真模型(如图2所示),分别在系统交流侧输电线路首端、中端和末端设置单相接地故障和两相接地故障,以计算两种故障发生时健全相产生的过电压值。仿真过程中故障发生时刻为3 s,持续时间100 ms。

计算结果分别如表1和表2所示。可以看出,当线路首端发生单相接地短路时,线路首端过电压幅值最大,达到40.21 kV;当线路中端发生两相接地故障时,线路首端过电压幅值最大,达到38.50 kV。

表1 交流线路单相接地故障后工频过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	40.21	36.42	31.74
中端	37.54	36.12	31.32
末端	37.36	34.59	32.61

表2 交流线路两相接地故障后工频过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	37.18	33.80	31.64
中端	38.50	37.36	32.00
末端	35.02	33.67	32.60

2.1.3 短路故障时的操作过电压

同样的,利用如图2所示的仿真模型,在系统稳定运行后($t=3$ s)对交流线路首段、中端、末端分别施加单相接地故障和两相接地故障,故障持

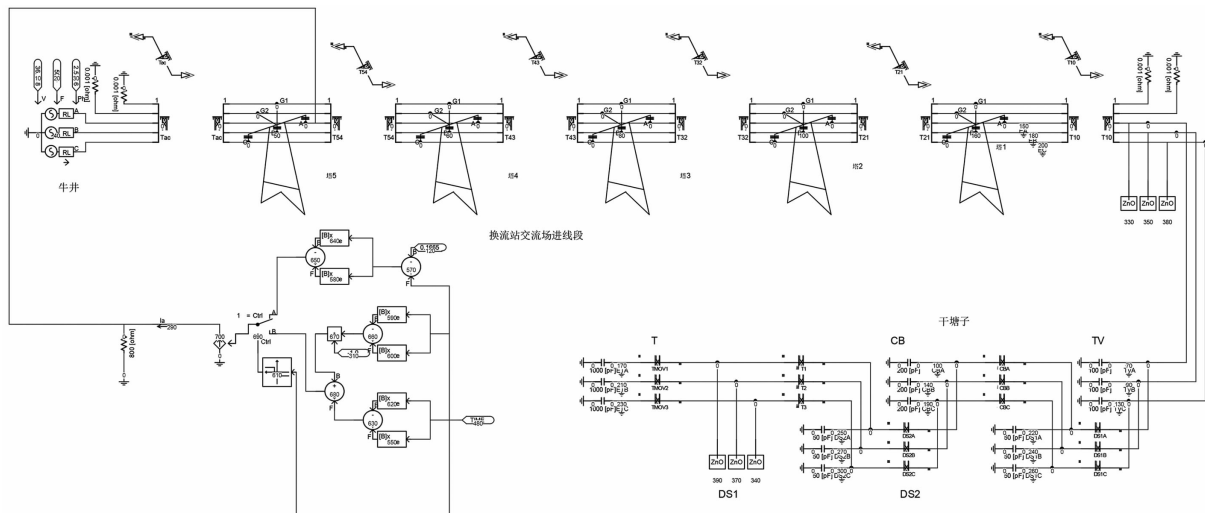


图 3 换流站的雷电过电压仿真模型

动作后,线路末端过电压幅值最大,达到 34.03 kV。

表 4 交流线路两相接地故障操作过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	34.03	32.20	30.94
中端	31.44	29.45	28.31
末端	32.10	28.42	28.21

2.2 直流侧暂态过电压

2.2.1 直流电缆外绝缘故障过电压

对电缆外绝缘出现破损时发生单极接地故障或极间短路故障引起的直流侧过电压进行仿真计算,仿真结果如表 5 所示。

表 5 直流侧外绝缘故障后直流侧过电压最大值

首端过电压最大值/kV	中端过电压最大值/kV	末端过电压最大值/kV
62.39	64.28	65.02

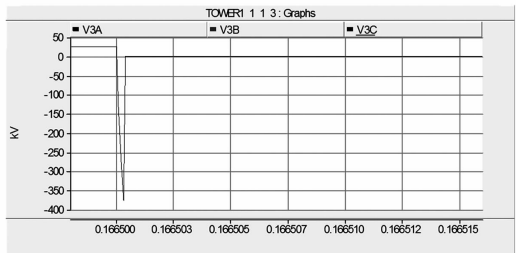
2.2.2 交流断路器动作换流阀两侧过电压

在系统交流侧线路首端分别设置单相接地故障和两相接地故障,仿真计算断路器动作时换流站换流阀两侧的暂态过电压值。仿真结果如表 6 所示。

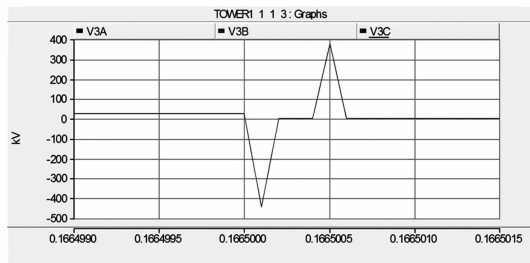
表 6 交流断路器动作换流阀两侧过电压最大值

故障类型	断路器动作	换流阀两侧电压幅值/kV
单相接地故障	分闸	127.31
两相接地故障	分闸	126.01

可以看出,当系统发生单相接地故障时,断路器分闸,换流阀两侧过电压最大可达 127.31 kV;当系统发生两接地故障时,断路器分闸,换流阀两侧过电压最大可达 126.01 kV。



(a) 雷电绕击工况



(b) 雷电反击工况

图 4 雷电绕击和反击工况下故障相绝缘子两端电压水平

续 0.5 s,计算断路器动作 100 ms 内,健全相首端、中端、末端产生的过电压最大值,仿真结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 交流线路单相接地故障操作过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	35.43	33.29	30.60
中端	38.28	35.92	31.82
末端	33.20	31.37	30.18

可以看出,当线路中端发生单相接地短路故障断路器动作后,线路首端过电压幅值最大,达到 38.28 kV;当线路首端发生两相接地短路故障断路器

3 避雷器配置与系统绝缘配合

由第 2 节计算结果可以看出,对于交流侧,当系统受到雷击时,设备承受的过电压很大;对于直流侧,交流断路器动作时换流阀两侧的过电压幅值均超过 100 kV,其中单相接地故障时分闸最高过电压值达到 127.31 kV,超过直流设备正常运行电压水平,因此必须进行避雷器配置来保护电气设备。

3.1 避雷器配置方案

该工程采用金属氧化物避雷器(metal-oxide surge arresters, MOA),其配置原则与常规柔性直流输电系统的避雷器配置原则相同^[14],由于工程电压等级较低,过电压水平不高,不是所有关键位置的过电压都会对系统造成威胁,因此可以对避雷器作适当的增减。

大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流输电系统换流站避雷器配置方案如图 5 所示。

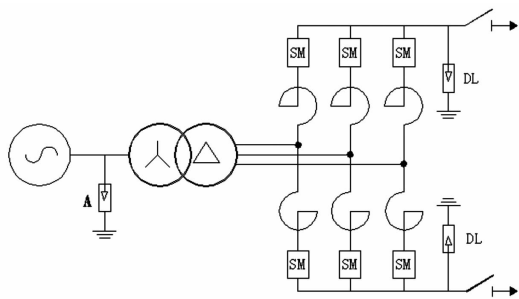


图 5 大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流输电系统换流站避雷器配置方案

1) 针对交流侧,主要是雷电过电压很大,工频及操作过电压水平较低,因此,结合过电压计算结果及系统主接线方案,采用在联络变压器出口和线路出线处同时装设交流避雷器 A。

2) 针对直流侧,由于与断路器动作时换流阀两端过电压水平相比,直流侧外绝缘故障后直流侧的过电压值较低,因此直流侧主要针对当故障断路器动作时换流阀两端过电压水平进行避雷器配置。同时直流配电电缆接多个分布式负荷或电源,存在多个直流极线出口,需在每一个出口处布置避雷器以保护出线端的设备,因此在换流阀和直流隔离开关之间装设直流避雷器 DL。

交流避雷器 A 和直流避雷器 DL 的相关参数如表 7 所示。

表 7 交流避雷器 A 和直流避雷器 DL 参数选择

单位:kV(有效值)

参 数	A	DL
系统标称电压	35	30
额定电压	51	48
持续运行电压	40.8	30.2
操作冲击残压	114	136
雷电冲击残压	134	145

配置避雷器后对系统交流侧雷电过电压和直流侧操作过电压水平重新进行计算。按照如图 5 所示避雷器配置方案在仿真模型中加入交流避雷器 A 和直流避雷器 DL,仿真结果分别如表 8 和表 9 所示。

表 8 配置避雷器后交流侧雷电绕击和反击过电压

单位:kV

设备	绕击	反击
电压互感器	55.22	62.07
1 号隔离开关	62.45	74.05
断路器	64.36	73.55
2 号隔离开关	59.03	65.10
联络变压器	93.46	78.24

表 9 配置避雷器后交流断路器动作换流阀两侧过电压最大值

故障类型	断路器动作	换流阀两侧电压幅值/kV
单相接地故障	分闸	83.57
两相接地故障	分闸	84.66

可以看出,配置避雷器后,交流侧的雷击过电压明显下降,当交流线路发生单相接地故障和两相接地故障时,断路器动作后,换流阀两侧过电压最大值分别为 83.57 kV 和 84.66 kV,均小于配置避雷器前的过电压值,直流避雷器 DL 最大吸收能量为 0.598 kJ,证明了避雷器配置的有效性。

3.2 电气设备绝缘配合

根据第 3.1 节避雷器的配置结果和配置避雷器后计算得到的各设备的雷电过电压和工频过电压值,本节参照国家标准 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[22]对交流侧和直流侧电气设备的绝缘水平进行选取。

值得注意的是,云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程位于云南省大理州,站址海拔约为 1730 m,为保证高海拔下设备的安全运行,其外绝缘水平需要进行海拔修正。根据 GB/T 50064—2014 给出的外绝缘放电电压气象条件校正方法进行修正,计算

得到该工程 35 kV 电压等级的海拔修正系数 k_a 估算结果(相-地)如表 10 所示。

表 10 35 kV 电压等级海拔修正系数 k_a 估算结果

工频过电压	操作过电压	雷电过电压
1.236 5	1.210 5	1.236 5

根据表 10 计算出的海拔修正系数 k_a , 可得到该工程 35 kV 电气设备的绝缘水平和直流侧电气设备的绝缘水平, 分别如表 11 和表 12 所示。

表 11 35 kV 电气设备绝缘水平及保护水平

设备名称	配合系数表				雷电冲击保护水平配合系数
	设备耐受电压值				
	雷电冲击耐压 /kV(峰值)		1 min 工频耐压 /kV(有效值)		
	内绝缘	外绝缘	内绝缘	外绝缘	
主变压器	200	248	95	117	1.45
其他电器	200	248	95	117	
断路器断口间	200		95		
隔离开关断口间		266		146	

表 12 直流侧电气设备外绝缘水平

设备名称	雷电冲击耐压水平/kV		短时工频耐压水平/kV	
	计算值	取值	计算值	取值
	功率单元	193	195	68
隔离开关	193	195	68	70

4 结 语

基于云南大理光伏升压 ±30 kV 柔性直流工程对低压柔性直流换流站的过电压与绝缘配合进行了详细的研究。利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建了工程系统的仿真模型, 仿真计算了未配置避雷器时系统交流侧的雷击过电压、交流输电线路发生不对称接地故障时的工频过电压和短路故障时操作过电压与直流侧的直流电缆外绝缘故障时的过电压以及交流断路器动作换流阀两侧过电压。计算结果表明: 交流侧的雷电过电压水平较高, 受到雷击时, 过电压最高可达 444 kV, 出现绝缘子闪络情况, 其他工况下过电压水平较低; 直流侧则是操作过电压水平较高, 当出现故障断路器动作时, 换流站换流阀两侧过电压水平较高, 达到了 127.31 kV。

根据过电压计算结果, 对系统交流侧雷电过电

压和直流侧操作过电压进行了避雷器配置, 在联络变压器出口和线路出线处同时装设了交流避雷器 A, 在换流阀和直流隔离开关之间装设了直流避雷器 DL, 并且确定了避雷器的具体参数。然后对工程电气设备进行了绝缘配合, 并且基于工程实际情况进行了海拔修正, 给出了工程设备最终的绝缘水平。研究结果对换流站设备的选型和制造具有指导意义, 为过电压计算与绝缘配合研究提供了有用的参考数据。

参考文献

- [1] Chamarthi Phanikumar, Vivek Agarwal, Mohamed Shawky El Moursi. New Self-balancing 7-level Inverter with Coupled Inductors for 1- ϕ Grid-connected Renewable Energy Systems with Voltage Boosting Capability[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(5):899-908.
- [2] Nagendra Singh, Sanjay K. Jain. Investigation of Three-level NPC-qZS Inverter-based Grid-connected Renewable Energy System[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(5):1071-1085.
- [3] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):1843-1856.
- [4] 刘耀, 吴佳玮, 肖晋宇, 等. 有源型柔性直流输电技术在全球能源互联网背景下的应用研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2):107-116.
- [5] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):1-10.
- [6] Xuemei Zheng, Yangman Li, Zhuang Liu, et al. Steady-state Control Strategy of VSC-HVDC Transmission System Based on Full-order Terminal Sliding Mode Control Method[J]. The Journal of Engineering, 2019(16):987-990.
- [7] 许小宁. 柔性直流输电技术的现状与运用前景[J]. 现代工业经济和信化, 2020, 10(1):77-78.
- [8] 王璐. 基于 MMC 的换流站内部故障及交流不对称故障保护策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [9] 顾亚旗. 含风电场的多端柔性直流输电系统控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [10] 严铭, 蔡晖, 谢珍建, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的分布式直流电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3):134-140.
- [11] 叶林. 柔性直流输电系统拓扑结构[J]. 中国高新技术, 2019(14):12-14.