

光伏升压柔性直流工程设计及调试技术研究

张 舵, 蒋艾町, 夏 雪, 李嘉逸

(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: 在梳理柔性直流的技术路线基础上, 针对西南某地区设备选型特点, 介绍了光伏直流汇入柔性直流输电工程的设计方案, 并论证了工程可行性。研究成果填补了低压柔性直流工程设计与调试技术的空白, 在国内开展新能源接入低压柔直输电工程建设具有一定的参考价值。

关键词: 低压柔性直流; 直流系统调试; 控制保护; DC/DC 变换; 预制舱式换流器

中图分类号: TM733 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.012

Research on Design and Commissioning Technology of Photovoltaic Boost Flexible DC Project

Zhang Duo, Jiang Aiding, Xia Xue, Li Jiayi

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering
Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Based on the summary of flexible DC technology and combined with the characteristics of Southwest China as well as the characteristics of low-voltage flexible DC technology and equipment level, the design and commissioning technical scheme of photovoltaic DC into flexible DC transmission project is introduced, and its feasibility is demonstrated. The research results fill in the blank of low-voltage flexible DC engineering design and system commissioning technology. It has a certain reference value for carrying out the construction of low-voltage flexible DC transmission and distribution project with new energy integration in China.

Key words: low voltage flexible DC; DC system commissioning; control and protection; DC/DC conversion; prefabricated cabin type converter

0 引 言

中国西南地区太阳能资源较丰富, 其中西南边境某省有 59 个县的年太阳能平均辐射量在 4500 ~ 6000 MJ/m²。2016 年 3 月西南边境某省新增的光伏总装机容量约为 940 MW^[1]。光伏发电存在诸多技术问题亟待解决, 如容抗感抗较大、无功传输问题严重、谐波谐振较为突出等。

柔性直流输电技术是国际上先进的构成多端直流输电网络的理想技术, 采用 IGBT 等新型电力电子设备, 可对有功、无功功率进行快速调控。近年来, 国内陆续投运的工程有“±200 kV 舟山多端柔性直流工程”“上海南汇多端柔性直流工程”等示范项目, 增强了中国电力行业在世界的技术影响

力^[2]。柔性直流输电技术有以下优势^[3]: 1) 不存在无功补偿和电压换向问题; 2) 能够实现四象限调节; 3) 系统潮流可控, 运行方式灵活, 对新能源的接入较为友好; 4) 具备系统黑启动的条件, 提供必要的电压和频率支持; 5) 输出电压谐波小, 设备占地少。

以往的光伏接入工程是通过汇流箱将光伏板产生的直流电汇集起来, 再进入 PCS 转换并入低压电网。而柔性直流输电技术具备有功无功独立控制能力, 对于低压配电网, 主要依靠配电网内部的潮流来平衡, 是解决分布式新能源并网的有效技术手段。

所设计的光伏升压柔性直流方案, 克服了所处地区海拔较高、工期要求紧张、施工场地空间受限等不利因素。这对于响应国家对清洁能源的利用要求、提高太阳能资源利用率、调整地方电网发展结构有极为重要的意义。

1 工程设计思路

1.1 设计仿真模型

PSCAD/EMTDC 是广泛使用的电力系统仿真软件,它既可以研究交直流电力系统问题,又能完成电力电子仿真及其非线性控制的多功能工具。所设计项目在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了模型,模型分为 3 个部分,分别为光伏组件及 DC/DC 直流变换器模型、MMC 换流阀模型以及交流系统模型,如图 1 所示。

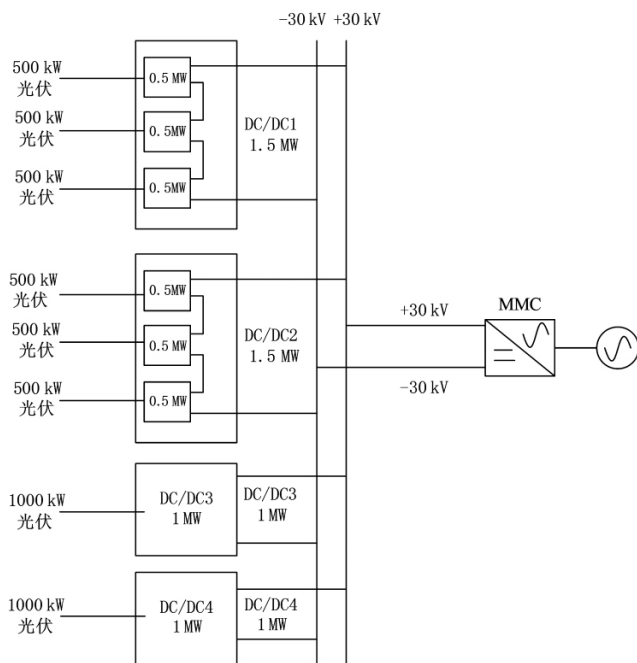


图 1 设计仿真模型拓扑结构

1.2 光伏直流升压对系统潮流的影响

在等值模型中,光伏电站通过换流阀连接至外部交流等值系统,即该连接线路上潮流为单向流动。光伏电站出力最大特点为其波动性,受光照强度影响较大。因此应考虑天气变化导致光伏出力变化时该线路潮流波动情况。

1) 模拟晴天时光照强度为 6:00 光伏电站启动,至 18:00 保持充足光照,18:00 后光伏电站停止出力。线路并网潮流模拟结果如图 2 所示:光伏电站在启动过程中会有小幅波动,但会迅速稳定在功率设定点;在光照条件充足时,光伏电站能够很好地稳定输出有功功率,线路潮流稳定。

2) 模拟阴天时光照强度为 6:00 光伏电站启动,光伏强度低于正常水平,在 6:00 至 10:00 时间段内光照强度缓慢回升,10:00 光照强度最高。12:00 模

拟天气变化,阴天情况下光照强度快速降低。18:00 后光伏电站停止出力。模拟的并网线路潮流如图 3 所示,光伏电站在启动过程中会有小幅波动,在光照强度逐渐增加时,光伏出力逐渐上升;当光照强度快速降低时,光伏电站出力呈现明显相关性随之下降。

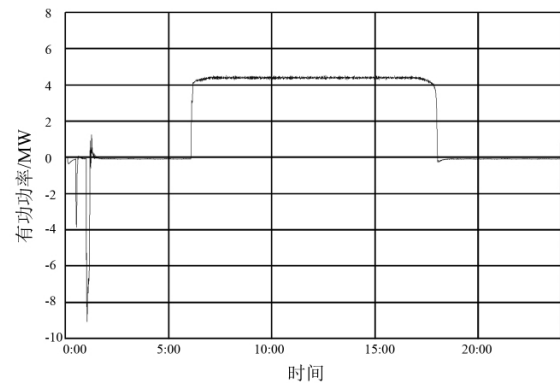


图 2 晴天时并网线路潮流变化

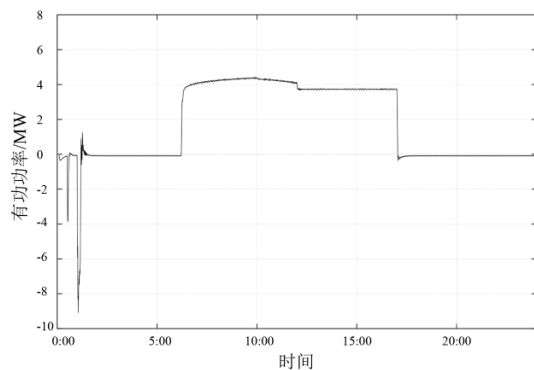


图 3 阴天时并网线路潮流变化

3) 模拟雨天时光照强度为 6:00 光伏电站启动,光伏强度低于正常水平,在 6:00 至 12:00 时间段内光照强度依然处于较低水平。12:00 模拟天气变化,雨天情况下光照强度快速降低。15:00 后光伏电站停止出力。线路并网潮流模拟结果如图 4 所示。当光照强度快速降低时,光伏电站出力呈现明显相关性随之下降。

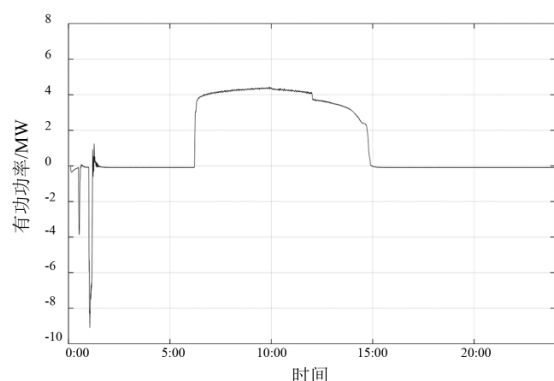


图 4 雨天时并网线路潮流变化
综合仿真分析来看,光照强度对光伏电站出力

影响较大,即受天气变化因素影响较大。虽然光伏并网线路上潮流为单向流动,不会改变日调度计划,但是有功功率大小具有随机波动性,对于日调度计划的制定有一定的影响。

1.3 设计方案概述

两端柔性直流系统送端为5 MW的光伏电站,通过直流汇集升压和DC/DC变换将直流电压提升至±30 kV,再通过长600 m的直流电缆线路输送至MMC换流站,最后经过换流站接入35 kV交流系统。结合柔性直流工程输送容量(5 MW)和距离(低于20 km)综合技术经济比较,该工程选择采用±30 kV电压等级,其导线经济电流密度合适、设备绝缘投资适中。工程电压等级采用±30 kV,架空导线推荐采用JL/G1A-70/10或者JKLF3YJ-70导线;直埋电缆采用载流量及热稳定校核进行控制,推荐采用DC-ZR-YJV62-30kV-50电缆。

2 电气一次设计方案

2.1 换流站主接线形式

国内投运的柔性直流工程中,主接线主要有单极对称、双极对称、组合接线、三级对称、LCC+MCC混合式等方式。目前应用较多和相对成熟的接线方式主要是单极和双极对称方式^[4-7]。图5为换流站单极对称接线方式示意图,该方式是国内已建设的柔性直流输电工程中应用最多的接线方式,类似三相全桥逆变器结构,不设接地极或金属回线,直流侧极线电位幅值相同正负相反,因此也被称为伪双极方案^[4-6]。此方案经济优势明显,结构相对简单,但是故障穿越能力较差,运行方式单一,可靠性较差^[6]。

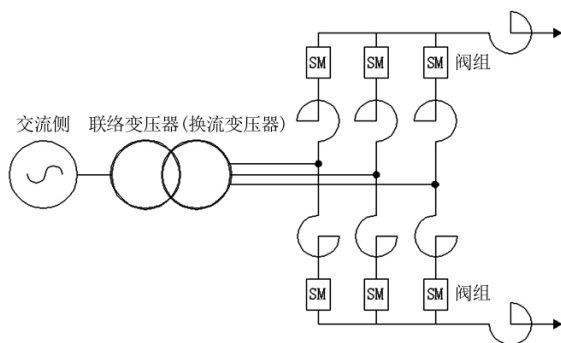


图5 单极对称接线

图6为采用两级对称接线方式,正负极是通过独立的六脉动桥结构、金属接地线在两桥之间与大地引接^[6]。与单极对称接线方式相比,双极对称接线方

式可靠性更高,有一定的故障恢复能力;但由于必须设置金属回线或接地极,且阀组设备数量较单极对称接线方案增加一倍,因此换流站总体造价较高。

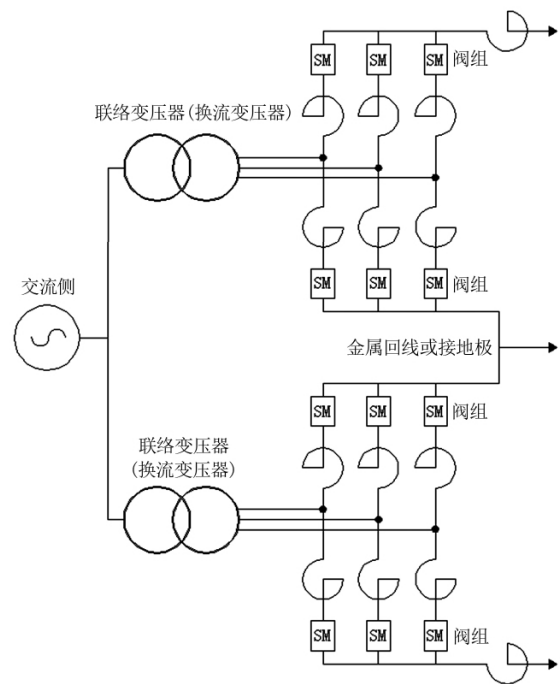


图6 双极对称接线

综合考虑电压等级及输送容量,选择换流站采用单极对称接线方式、直流线路采用电力电缆线路,以提高项目运行的可靠性,降低短路故障发生概率。

2.2 接地方式

接地方式的选择是柔性直流输电工程的重要设计内容之一,对系统的暂稳态特性和换流站的绝缘配合有着重要影响^[8]。针对单极对称接线方式,结合所设计工程的电压等级及输送距离,可选的接地方式有联络变压器Y绕组接地、钳位电阻接地、电抗器接地和对侧光伏电站接地4种方式^[9-12]。

联络变压器Y绕组接地方式是通过联络变压器阀侧的星型绕组中性点经接地电阻接地^[9]。在所设计的工程中,它确定的换流站接入交流侧的方案中的35 kV交流侧的接线方式均为Y接线。由于本站不具备常规联络变压器Y绕组接地的条件,若在本站采用该种接地方式,则需考虑订制三绕组YΔY非标变压器。

钳位电阻接地指在直流侧极线上并联两个相同大电阻,形成等效电路,实现换流站的接地。这种接地方式结构简单、成本不高,但是当换流站正常运行时接地电阻会产生一定的功率损耗,同时,接地故障时可能会对保护的灵敏性产生不利影响且增加接地

极工程量^[9]。因此,不推荐采用钳位电阻接地方式。

电抗器接地方式是通过换流变压器阀侧并联电抗器,经高阻接地方式从电抗器中性点引至大地^[10]。该方式优势是如果系统发生直流侧接地故障,系统对换流变压器阀侧的接线形式没有特定限制。但劣势是系统无功支撑不足,会造成系统无功损耗严重、母线电压产生波动。另外,多个并联电抗器会增加系统的成本^[10-11]。考虑到运行损耗及实验可靠性要求,不推荐采用电抗器接地的方式。

对侧光伏电站接地是直接利用工程换流站对侧光伏电站的接地来为直流系统提供接地点^[8]。由于所设计工程直流线路距离较短,因此采用此方案对于节约占地面积、提高设备利用率、降低投资具有一定意义,同时还可以为系统提供等电位参考点。

2.3 换流站总平面布置方案研究

综合考虑所设计工程换流站的占地、运行与电压情况,光伏柔性直流换流站的换流阀组采用预制舱形式布置,除换流阀组外联络变压器、电抗器、启动电阻、隔离开关及避雷器等均采用户外布置。同时,新增加接入的35 kV交流开关柜采用预制舱安装形式。考虑到户外油浸式换流联络变压器防火距离需求,将换流站3台阀组预制舱布置于靠近35 kV开关室侧;将户外电抗器、隔离开关及油浸式换流联络变压器布置于预制舱东侧;在中间设置设备运输道路,并保证防火间距要求。阀组预制舱内包括阀组及控制柜,预制舱整体由设备厂家统一设计,并满足舱内相应设备运行环境要求。具体的布置方案如图7和图8所示。

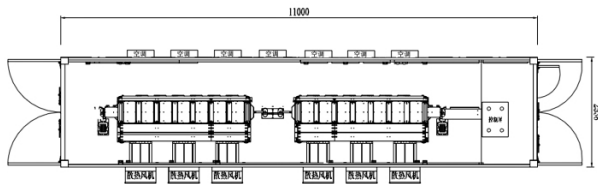


图7 阀组预制舱布置方案

3 控制保护设计方案

光伏直流升压汇集接入系统控制保护系统分3层(监控层、站控层、单元层)、两网(站控A网、监控A网)的架构方式。光伏升压系统配置4个通信控制保护子站,用于完成光伏升级系统的保护控制功能和外接控制系统的通信接入。

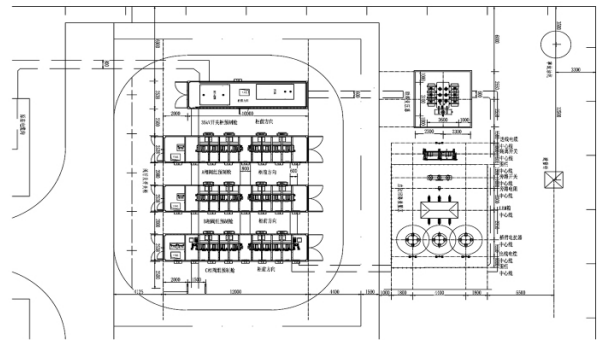


图8 换流站整体布置方案

1) 监控层:实现各站运行人员的监视与控制功能;完成直流系统运行方式、启动与停止、电压切换等功能。

2) 站控层:实现逆变站、光伏升压站站一次设备与其相连交直流线路、换流阀和DC/DC变换装置的控制、保护以及与控制主站系统配合实现柔性直流系统运行方式切换、故障穿越、隔离、恢复等功能。

3) 单元层:包括可控电力电子设备及其控制系统,可按照控制保护层设备的命令对其进行控制。

如图9所示,系统按控制保护功能分为逆变站保护区、直流线路保护区、汇流母线保护区、汇集线路保护区。根据功能分区配置相应的控制保护设备,从光伏DC/DC变流器到汇集母线出口处的线路构成了汇集线路保护区,其保护安装点位于汇集母线出口处。汇集母线出口处的各个保护安装点包围的区域为汇流母线保护区。从母线送出线路出口保护安装点到MMC直流侧出口构成了直流线路保护区。MMC变换器和联络变压器构成逆变站保护区。

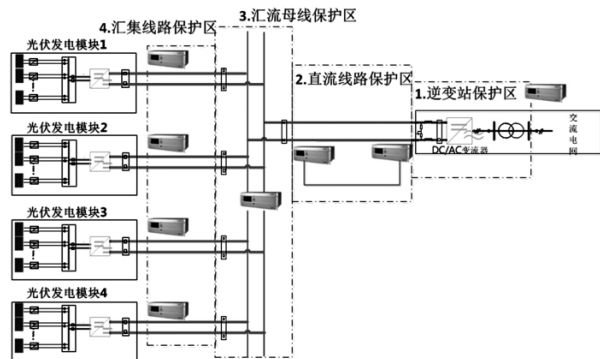


图9 控制保护功能分区及装置布置

4 换流站系统调试

调试总体分为换流站系统、联络变压器、DC/DC升压站以及系统联合调试。完成换流站系统调试和

联络变压器及 DC/DC 升压站调试后,开展柔性直流配电系统联合调试,调试内容覆盖系统所有运行方式。MMC 及 DC/DC 启动流程如下。

系统启动包括 4 种启动方式:1) MMC 已运行,手动启动 DC/DC 单元;2) MMC、DC/DC 启动运行;3) MMC 运行,DC/DC 单元自动启动;4) 功率限制情况下,优先启动集中式 DC/DC 单元。其启动方式如图 10 所示。

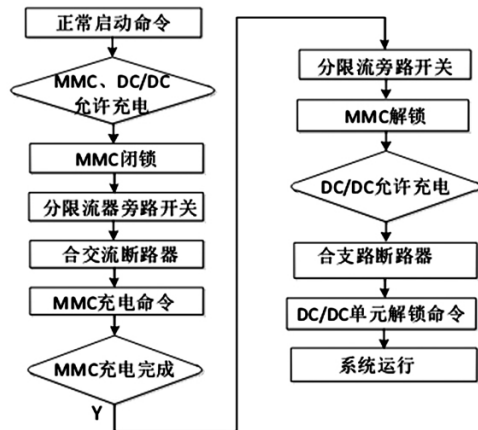


图 10 MMC、DC/DC 启动运行

系统主要调试内容如下:

1) 换流站系统调试

换流站系统调试主要是验证全站设备的各项技术指标和参数是否符合设计和运行要求。验证换流阀阀体与辅助设备交流空载运行能力、换流阀及 DC/DC 设备的二次继电保护与变电站监控系统的协调能力、全站通信设备是否正常、系统切换及多方式运行是否正常等性能技术指标。

2) 系统联合调试

完成换流站系统调试和联络变压器系统调试后,开展含 DC/DC 升压站的柔性直流配网系统联合调试:(1) 确认当前 35 kV 侧系统电压处于 32.5 ~ 39 kV 之间;(2) 确认处于 STATCOM 模式运行方式下,控制模式设定为稳态定电压控制;(3) 确认系统运行正常,无故障告警;(4) 确认录波设备工作正常;(5) 换流器以当前模式运行 8 h,每隔 2 h 提取录波数据;(6) 试验完毕,停止换流器。

5 结 语

上面从设计思路、电气接线形式、接地方式、总体布置、控制与保护、系统调试 6 个方面,提出了光

伏柔性直流工程的设计与调试方案,并结合工程具体设计方案进行了探讨分析。研究成果对开展低压柔性直流工程建设具有一定的参考价值,为了使系统更可靠运行,DC/DC 直流变压器与 MMC 变换器之间配合协调运行仍需进行深化研究。

参考文献

- [1] 施光辉,张新左,毛祁平,等. 云南省光伏发电现状分析. 云南师范大学学报, 2017, 37(2): 25-27.
- [2] 季舒平. 上海南汇柔性直流输电示范工程关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [3] 贾勇鑫. 柔性直流输电技术的特点及应用前景分析[J]. 电子世界, 2018(12): 51-51.
- [4] 李晋. 大容量多端柔性直流系统换流站布置方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [5] 陈振新. 基于 MMC 的柔性直流换流站主接线方案研究[C]. 中国电力科学研究院. 2018 智能电网新技术发展与应用研讨会论文集编辑部, 2018: 347-351.
- [6] 韩炜炜. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 电子测试, 2018(1): 109-110.
- [7] 王赞,方乙君,梅念,等. 柔性直流换流站直流接地点选择探讨[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 212-217.
- [8] 刘情新,刘森,张志鹏. 柔性直流换流站接地方案设计[J]. 河北电力技术, 2019, 38(5): 42-45.
- [9] 吴方劼,马玉龙,梅念,等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2651-2657.
- [10] 傅春翔,汪天呈,郦洪柯,等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.
- [11] 陈晴,薛源,王克,等. 用于海上风电并网的柔性直流系统过电压和绝缘配合研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 178-184.
- [12] 梅念,陈东,吴方劼,等. 基于 MMC 的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1247-1253.

作者简介:

张 舵(1988) 硕士,工程师,从事智能电网技术、综合能源系统的研究工作;

蒋艾町(1993) 硕士,助理工程师,从事智能电网技术、综合能源系统的研究工作;

夏 雪(1981) 硕士,高级工程师,从事电气一次、综合能源系统的研究工作;

李嘉逸(1975) 硕士,高级工程师,从事继电保护、综合能源系统的研究工作。

(收稿日期: 2020-03-20)