

# 柔性直流输电技术在江北电网中的应用研究

雷宇

(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:**柔性直流输电技术是一种以电压源换流器技术为基础开发的新型高压输电技术,在改善交直流相互影响和提高电网稳定性方面具有显著作用。文中针对重庆江北电网中存在的下网负荷分布不均、金山变电站失电风险以及220 kV侧短路电流裕度小等问题,分析了柔性直流输电的技术特点及在城市配电网中的工程应用,结合重庆江北电网运行问题,提出了交、直流两种方案解决220 kV电网中金山变电站500 kV失电后产生的过载问题,并提出了应用柔性直流输电技术解决110 kV电网中220 kV变电站负载不均衡的问题,为其他工程应用柔性直流输电技术提供指导。

**关键词:**柔性直流输电; 电网失电; 工程应用

**中图分类号:**TM 721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0048-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230409

## Application of Flexible DC Transmission Technology in Jiangbei Power Grid

LEI Yu

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

**Abstract:** Flexible DC transmission technology is a new type of high-voltage transmission technology developed based on voltage source converter technology, which plays a significant role in improving the interaction between AC and DC and improving the stability of power grid. The technical characteristics of flexible DC transmission are firstly analyzed in response to the uneven distribution of offline loads, the risk of power loss in Jinshan substation, and the small margin of short-circuit current on 220 kV side in Chongqing Jiangbei power grid. Then, a detailed discussion is carried out on flexible DC transmission technology and its engineering application in urban distribution networks. Finally, based on the research on operation problems of Chongqing Jiangbei power grid, two solutions of AC and DC are proposed to solve the overload problem caused by 500 kV power loss in Jinshan substation in 220 kV power grid. The application of flexible DC transmission technology is also proposed to solve the problem of unbalanced load in 220 kV substations in 110 kV power grid, which provides a guidance for the engineering application of flexible DC transmission technology.

**Key words:** flexible HVDC transmission; power loss of power grid; engineering application

## 0 引言

柔性直流输电(voltage sourced converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)是一种以换流器为基础的新型高压输电技术<sup>[1-2]</sup>。它将半控型电力电子器件升级为全控型电力电子器件,具有响应速度快、可控性好、运行方式灵活、可向无源网络供电、不会出现换相失败及易于构成多端

直流系统等优点<sup>[3-5]</sup>。柔性直流输电技术在孤岛送电、海上风电直流送出等方面具有独特的优势,对新型电力系统建设中大规模新能源消纳和电网智能化、数字化发展建设具有重要作用<sup>[6-9]</sup>。

20世纪90年代,Boon-Teck Ooi等人第一次提出了高压直流输电的电力网络建设理念<sup>[10-11]</sup>。1997年瑞典首次进行了柔性直流输电技术在工程中的应用<sup>[12]</sup>。2010年西门子公司提出了基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术,并首次在美

国的 Transbay Cable 工程中应用成功<sup>[12]</sup>。同时,ABB、Alstom 公司也相继提出了类似结构的级联两电平(cascaded two-level,CTL)、MaxSine 型有源滤波器等换流阀设计<sup>[13]</sup>,截至 2021 年年底,柔性直流输电工程在全球的投运量已经超过了 50 个,总变电容量达到了 60 GW。在国外广泛应用柔性输电技术的背景下,中国的柔性直流输电技术也迎来迅速发展,2006 年,国内研究机构把握行业发展趋势,提出了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter,MMC)技术的柔性直流输电工程应用研究。2011 年 7 月,国内第一个柔性直流输电项目在上海南汇投入运行<sup>[14-15]</sup>,线路总长度约 8 km,南汇风电场通过该工程接入上海电网验证了柔性直流系统在风电接入中的作用。随着鲁西背靠背工程、舟山多端柔性直流输电工程、昆柳龙直流工程以及广东柔性直流背靠背工程的相继运行,柔性直流输电工程在中国的运用更加广泛。

现有柔性直流输电工程运行情况表明,在直流侧发生故障时是否具备较强的生存能力是评估柔性直流输电系统性能的重要依据。调研分析可知,尤其是在多端直流输电运行场景下,直流断路器速度慢以及直流故障对现有电网有较大影响等因素是导致直流断路器在电压高、容量大等运行场景下使用较少的主要原因<sup>[16-18]</sup>。因此,实际应用场景下的直流输电技术仍有待进一步的研究。

重庆江北电网供区为江北区、渝北区、北部新区以及两江新区,该地区电网的负荷密度大、重要性高,事故发生后的停电影响较大。然而目前江北电网还存在变电站下网负荷分布不均匀、已有变电容量利用不充分、金山变电站存在失电风险以及 220 kV 侧短路电流裕度小等问题,给该地区的电网安全运行带来了挑战。

大电网中柔性直流输电技术的灵活运用,对于解决交流和直流之间的干扰困境,增强电力网的稳定运行能力有着十分重要的作用。下面分析了柔性直流输电技术的原理和特点,详细论述了柔性直流输电技术在城市配电网中的应用问题;结合背靠背柔性直流输电技术特点,提出了交、直流方案以解决重庆江北电网中 220 kV 电网思源—金山 500 kV 线路发生  $N-2$  故障后的电流过载问题;在 110 kV 电网中应用柔性直流输电技术解决 220 kV 变电站负载不均衡的问题;通过技术经济对比验证了柔性直流

输电方案的经济性和良好效果。

## 1 柔性直流输电的技术特点

### 1.1 技术原理

柔性直流输电技术分别通过开通时间和关断时间控制电力电子器件的运行方式,使电流源换流器按照既定方式工作,同时幅值参数和相角参数在输出电压中的数值也会相应改变控制交流测的有功、无功功率<sup>[19]</sup>,以实现功率在线路中正常输送的同时电网能够平稳运行,由此可以高效地解决现有输电技术所具有的某些内在缺陷。在柔性直流输电系统中,换流器是最重要的组成部分,主要包括两电平换流器、二极管箝位型三电平换流器和模块化多电平换流器等。

### 1.2 技术特点

1) 运行模式多样、控制性能良好。在弱交流系统中,柔性直流输电的送电优势明显,在面对无源系统时也能够提供较高质量的送电服务,其巨大优势在分布式发电并网、电力系统互联和市区供电等方面作用巨大。

2) 换相失败风险低。电网故障发生时,柔性直流输电可以对交流系统故障进行全穿越,并且能够提供动态无功补偿给电网,促进电网的安全稳定运行。

3) 谐波含量小。电压源换流器只有很少的谐波含量,所以没有必要设置单独的滤波器,极大地节省了设备的装置空间。

另外,柔性直流输电在灵活潮流分布、运行稳定性、有功和无功的解耦等方面也有诸多优势。

## 2 柔性直流输电的工程应用分析

### 2.1 柔性直流在城市配电网中的应用

目前在城市配电网中普遍采用高压分区、中压开环的运行模式,严重影响了配电网的稳定性和系统设备的使用时间。采用灵活的柔性直流输电技术将隔离的高、中压配电网连接起来,构建起交、直流混合配电网,既能够使电力系统的可靠性得到增强,又能够有效地解决系统设备的低效率利用问题,还能为负荷中心的电力系统提供有效的无功支持。国内已投运柔性直流输电工程如表 1 所示。

表 1 国内投运柔性直流输电工程

工程名称	投运年份	容量/ MW	直流电压/ kV	应用场景
上海南汇	2011	20	±30	新能源并网
舟山五端	2014	400,300, 100×3	±200	新能源并网
鲁西背靠背工程	2016	1000	±350	电网柔性互联
张北直流工程	2020	3000,1500	±500	无源网络供电
昆柳龙直流工程	2020	5000,3000	±800	远距离输电
白鹤滩直流工程	2022	4000	±800	远距离输电

通过工程验证和技术积累,柔性直流输电技术在配电网中实际应用的稳定性不断提高,如昆柳龙直流工程采用的是常规直流与柔性直流混合联接方案,满足了电网实际运行需求的同时提高了工作效率。但实际应用证明,在柔性直流输电网络中不可靠因素仍然存在,功率组件的旁路故障是最为普遍的一种,电气设备的不可靠连接以及二次板卡失效是最常见的原因,其次是取能电源故障。可通过增加抗电磁干扰装置、改进工艺提升元件质量等方式降低功率模块旁路发生概率。因此,城市配电网中的柔性直流输电技术应用仍有待进一步改进以降低故障发生率。

## 2.2 柔性直流输电容量限制

柔性直流输电的容量上限是由其所处的电压级别以及所传输的电流所决定的。前者的影响因素很大程度上依赖于 IGBT 等元件的电压耐受能力以及变换器的结构等;后者则主要受传输线的抗热性能制约,一般情况下,同样横截面积的架空线所能传输的电流要大于电缆。直流电压等级提升需要增加换流阀的串联模块数量,并可能需要适度增加控制保护系统的复杂性。现已建成厦门±320 kV 柔性直流工程额定功率为 1000 MW,额定电流为 1563 A。全球已建成并投运的柔性直流输电系统传输容量和传输电压之间的关系曲线如图 1 所示。

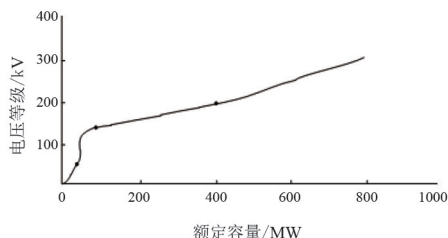


图 1 柔性直流工程输电容量与电压等级的关系

## 2.3 直流输电线路造价

由于直流电缆对绝缘性能的需求较少,所以其生产成本不会比交流电缆高。总的来说在同样的绝缘等级下,电缆所能承受的直流电压大约是交流相电压的 1.5~2.0 倍,所以可以在直流系统中直接使用交流电缆,对双极直流电缆进行价格估计时,以单相交流电缆的价格作为参考并加倍即可。另外,柔性直流输电也可以采用架空线路,张北柔性直流工程即采用架空线路进行直流输电。在后续多端直流系统构建时,可以通过加装断路器提高直流系统的可靠性与稳定性。

## 2.4 柔性直流工程规模与投资

交流滤波器、交流变压器、直流电容器与换流器及其通风冷却设备等是换流站的主要设备。从已有直流输电项目建设情况推断,交直流换流站电压等级、电流水平等因素与其建设成本之间并无直接联系,所以可以将换流站的投资成本统一按照 1000 元/kVA 来进行计算。若是百兆瓦级的柔性直流在国内生产推广,换流站每千伏安的投资将进一步下降,柔性直流的应用将更加广泛。

根据渝鄂背靠背工程研究结果,该工程推荐采用±500 kV 柔性直流方案。渝鄂柔性直流背靠背换流站额定功率可优化提高到 1250 MW,其 4 个换流单元将具备 5000 MW 输送能力。具体参数如表 2 所示。

表 2 投资与规模统计表

项目	南通道	北通道
站址及占地面积	杉树园站址, 80 000 m <sup>2</sup>	龙泉换流站合建, 70 000 m <sup>2</sup>
背靠背换流站 工程造价/亿元	28.4	25.7
单位造价/(元·kW <sup>-1</sup> )	1419	1285

## 3 柔性直流输电在江北电网中的应用设计

### 3.1 江北电网运行问题

重庆江北电网服务于江北区、渝北区、北部新区及新成立的两江新区(82%面积)4 个行政区,供电面积达 1 541.3 km<sup>2</sup>,区域内大部分地区为主城区,经济发展快、居民密度大、负荷强度高,电网负荷重要性高,事故发生后的停电影响较大。地区基本情

况如表3所示。

表3 江北电网概况

项目	数量
地区总人口/万人	157
现有用电客户/万户	72
变电站/座	28
变电容量/MVA	3240
线路数/条	377
线路总长/km	3213
开闭所/座	173
配电房/座	850

分析江北电网的运行情况主要存在以下几个方面的问题:

1) 变电站下网负荷分布不均匀,已有变电容量利用不充分

500 kV 层面,2017—2020 年石坪变电站所供 220 kV 负荷共计约 1600~1750 MW;金山变电站 220 kV 下网负荷即达到 930 MW,且随着负荷的增长下网负荷逐年上升。而因 220 kV 侧接入电源容量较大,思源片区 500 kV 下网压力相对较小,2017—2020 年思源变电站 220 kV 下网负荷约为 550~950 MW。明月山变电站所供区域负荷也较小,2017—2020 年下网负荷约 110~520 MW。

220 kV 层面,翠云、人和、大竹林、高屋等变电站的负载较重,容载比常年处于 1.3 以下,不能满足主变压器  $N-1$  供电的需要。而悦来、礼嘉以及大云变电站,负载率均较低。

2) 金山变电站存在失电风险

金山变电站通过金山—思源同塔双回 500 kV 线路与 500 kV 主网相连,当金山—思源 500 kV 线路发生同塔双回倒塔故障,金山变电站将失电,金山—思源 500 kV 线路上的潮流将通过思源—悦来—翠云—金山 220 kV 线路转供。当金山变电站下网负荷过大时,思源—悦来、悦来—翠云线路都将出现过载。

3) 220 kV 侧短路电流裕度小

思源变电站、石坪变电站 220 kV 侧的短路电流均较大,其中思源变电站 220 kV 侧三相短路电流为 44.08 kA,石坪变电站 220 kV 侧三相短路电流为 40.09 kA。金山变电站投产初期,与思源变电站合环运行,思源中压侧短路电流达 49 kA,接近断路器最大开断电流 50 kA,需将草街电站解环至铜梁—

板桥供区运行来降低短路电流。

### 3.2 220 kV 电网柔性直流输电方案

在 220 kV 电网中应用柔性直流输电技术,主要考虑在不明显增加短路电流的基础上,解决金山变电站 500 kV 失电后产生的过载问题。

当思源—金山 500 kV 线路发生  $N-2$  故障后,思源—悦来—翠云 220 kV 通道将出现过载现象,思源—悦来断面潮流、悦来—翠云断面潮流以及思源变电站下网负荷都将超过了主变压器容量。若合上思源、石坪、金山变电站之间任何 220 kV 线路,如石坪—高屋或翠云—石坪线路合上运行,则思源变电站中压侧短路电流将超过 50 kA。

为解决上述问题,提出了以下两种方案。

1) 交流方案

建设金山—石坪 500 kV 双回输电线路,线路长度约 20 km/回,方案线路分布如图 2 所示。

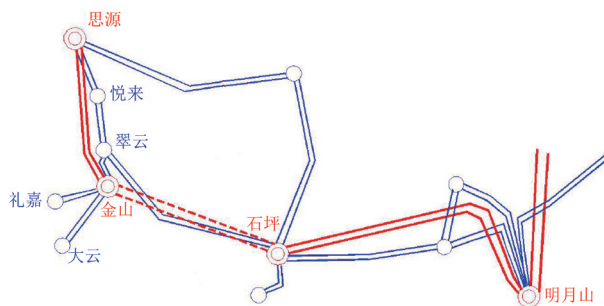


图2 新建金山—石坪交流输电通道

2) 柔性直流方案

在石坪—翠云已有 220 kV 线路上加装柔性直流背靠背输电装置,方案线路分布如图 3 所示。

增加金山—石坪 500 kV 输电通道后,如需暂缓建设金山第三台主变压器,可考虑通过断开金山—翠云双回 220 kV 线路,解开金山与思源的电磁环网。这时,当金山—思源 500 kV 线路发生  $N-2$  故障之后,系统的潮流分配是合理的,并且各线路和主变压器都没有过负荷。

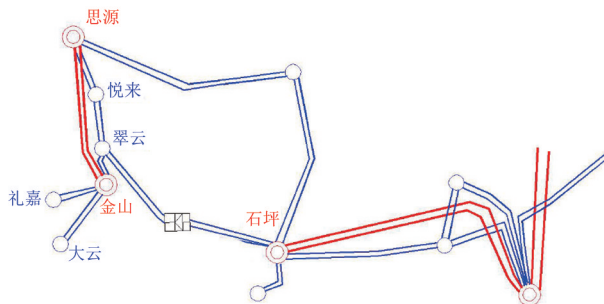


图3 在石坪—翠云通道装设柔性直流输电装置

在翠云—石坪已有的 220 kV 线路上加装柔性直流背靠背输电装置后,将石坪—翠云断面送电容量置于 500 MW,当石坪变电站发生主变压器  $N-1$  的情况下,可利用柔性直流输电装置的快速功率调制功能,将石坪—翠云断面的送电容量降低,以保证石坪变电站主变压器不过载。当思源—金山发生  $N-2$  故障后,潮流如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,由于新增了 220 kV 线路通道,使得故障发生后思源、石坪变电站均可以对金山变电站的负荷形成支援,所有的线路及主变压器均不会发生过载现象。

交、直流方案比较结果如表 4 所示。

表 4 交直流方案比较

对比项	交流方案	直流方案
潮流分布	能满足正常及思源—金山 $N-2$ 情况下送电要求	能满足正常及思源—金山 $N-2$ 情况下送电要求
短路电流影响	使全网 500 kV 三相短路电流有不同程度的增加,其中思源变电站短路电流增加约 10 kA,金山、石坪变电站短路电流增加约 15 kA	不明显增加电网的短路电流
投资	约 28 亿元	约 5~10 亿元
实施的难易	由于没有走廊,需建设 500 kV 电缆通道,实施难度较大	在已有线路上增加柔性直流装置,实施难度相对较小

### 3.3 110 kV 电网柔性直流输电方案

在 110 kV 电网中应用柔性直流输电技术,主要

考虑在不明显增加短路电流的基础上,解决 220 kV 变电站负载不均衡的问题。

#### 1) 翠云—悦来片区

翠云变电站常年负荷较重,还存在转供大竹林、人和、高屋变电站负荷的可能,而悦来变电站负荷较轻。随着望乡输变电工程的投产,空港—翠云双回 110 kV 线路将接入悦来站,形成空港—望乡—悦来—翠云双回 110 kV 线路。因此,可考虑在悦来—翠云 110 kV 通道加装柔性直流背靠背装置,充分利用悦来空置的变电容量解决翠云重载问题,线路分布如图 5 所示。

#### 2) 人和—大云—翠云片区

翠云、人和变电站常年负荷较重,容载比长期处于较低状态,而大云变电站负荷较轻,可考虑在大云和万年变电站之间新建柔性直流背靠背输电通道,同时将万年变电站负荷改由人和变电站供电,可缓解翠云、人和变电站的供电压力,充分利用大云变电站的容量。线路分布如图 6 所示。

在石坪—翠云通道装设柔性直流背靠背输电装置后的电网潮流如图 7 所示。由潮流计算结果可知,在江北 110 kV 电网建设柔性直流背靠背输电工程,可充分利用 220 kV 轻载变电站的变电容量,缓解 220 kV 重载变电站的下网压力,使各模块在正常工作时负荷得到平衡,从而提高系统的安全性和经济性。

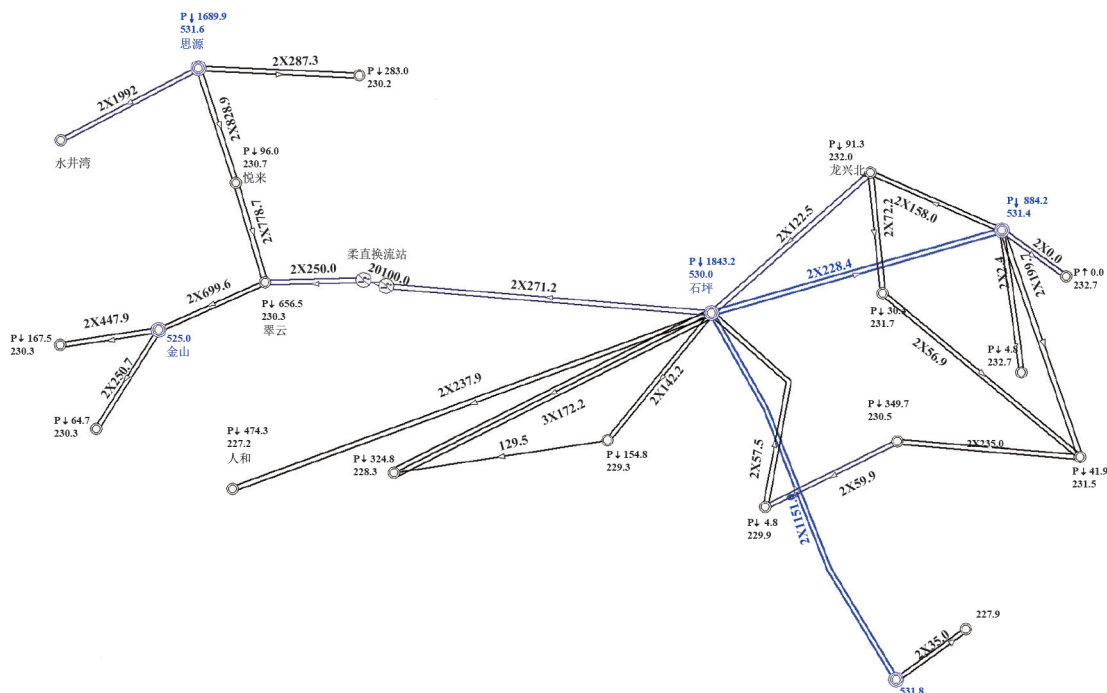


图 4 采用柔性直流方案的江北电网潮流(局部)

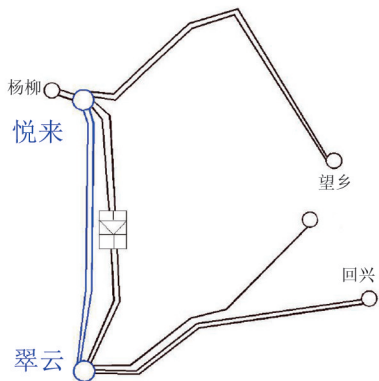


图 5 在悦来—翠云线路上加装柔性直流装置

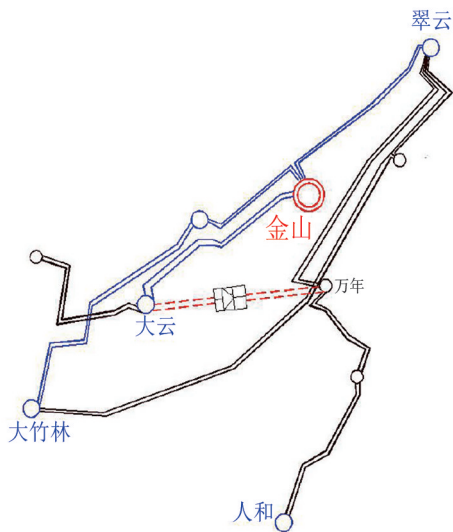


图 6 新建大云—万年柔性直流背靠背通道

### 3.4 方案效果分析

在 220 kV 电网中,在石坪—翠云已有 220 kV 线路上加装柔性直流背靠背输电装置后,可通过功率调制降低送电容量来保证石坪主变压器不过载。并且当思源—金山 500 kV 发生 N-2 故障后通过负荷支援,所有的线路及主变压器均不会过载。相比于交流方案,柔性直流方案在达到预期目标的同时不明显增加电网短路电流,投资规模更低,经济效益更好,且更容易实施。

在 110 kV 电网中,通过在悦来—翠云 110 kV 通道加装柔性直流背靠背装置,实现了悦来变电站空置变电容量的充分利用,同时解决了翠云变电站重载问题,将万年变电站负荷改由人和变电站供电后,充分利用大云变电站容量,缓解了翠云、人和变电站的供电压力。

## 4 结 论

上面介绍了柔性直流输电技术的原理和特点,研究了柔性直流在城市配电网中的应用问题,并在分析江北电网面临问题的基础上,提出了柔性直流输电在江北电网中的应用方案。主要结论如下:

1) 柔性直流输电技术能够高效用于新能源接入、孤岛电网以及分布式电源入网等方面,在城市配电网中使用柔性直流输电技术既能够使电力系统的

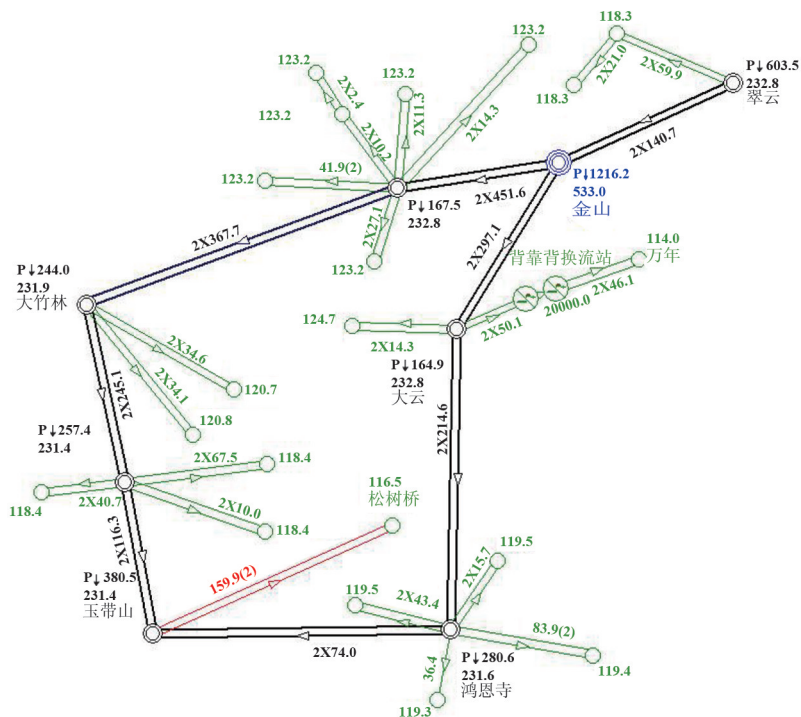


图 7 石坪—翠云装设背靠背装置后江北电网 110 kV 及以上潮流(局部)

(下转第 80 页)

- [8] 袁家海,席星璇.我国电力辅助服务市场建设的现状与问题[J].中国电力企业管理,2020(7):34-38.
- [9] 曾鸣,王雨晴.提升电力系统综合调节能力 支撑新型电力系统建设——解读《电力并网运行管理规定》《电力辅助服务管理办法》[J].中国电力企业管理,2022(1):8-10.

#### 作者简介:

马瑞光(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为能源

(上接第 53 页)

可靠性得到增强,又能够有效地解决系统设备的低效率利用问题。

2)在江北 220 kV 电网中建设柔性直流背靠背输电工程,在不明显增加短路电流的基础上,解决了金山变电站 500 kV 失电后产生的过载问题,相比于交流方案,投资更低、实施难度较小。

3)在江北 110 kV 电网中建设柔性直流背靠背输电工程,可充分利用 220 kV 轻载变电站的变电容量,缓解 220 kV 重载变电站的下网压力,实现了各分区之间的负荷均衡,提升了系统的经济性和安全性。

#### 参考文献

- [1] 王帆,刘一民,杨慧敏,等.柔性直流输电并网建模及故障分析[J].控制工程,2020,27(7):1293-1298.
- [2] 汤广福,庞辉,贺之渊.先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.
- [3] 饶宏,黄伟煌,郭知非,等.柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J].高电压技术,2022,48(9):3347-3355.
- [4] 黄素娟,吴爽,冯秋侠.柔性直流技术在配电网中的应用及运行控制[J].电工电气,2023(1):34-38.
- [5] LOUREN L F N, PEREZ F, IOVINE A, et al. Stability analysis of grid-forming MMC-HVDC transmission connected to legacy power systems[J]. Energies, 2021, 14(23):8017
- [6] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.
- [7] 肖磊石,盛超,卢启付.南方电网首台机械式高压直流断路器在柔性直流输电系统挂网短路试验及仿真[J].高电压技术,2019,45(8):2444-2450.
- [8] 李岩,罗雨,许树楷,等.柔性直流输电技术:应用,进步与期望[J].南方电网技术,2015,9(1):7-13.
- [9] 单节杉,任敏,田鑫萃,等.基于故障电流回路特性的柔

经济、电力市场、电网规划;

王潇笛(1994),男,博士,助理工程师,研究方向为电力市场、优化运行;

刘洁颖(1990),女,硕士,工程师,研究方向为电力市场、电力电量平衡;

马天男(1992),男,博士,高级工程师,研究方向为宏观经济、电力价格、电力市场。

(收稿日期:2022-11-31)

性直流架空线路纵联保护[J].电力系统自动化,2022,46(21):152-159.

- [10] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.

- [11] LIU D, KISH G J, AZAD S P. Control strategies to improve stability of LCC-HVDC systems with multiple MMC taps[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019,13(20):4685-4693.

- [12] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等.柔性直流输电发展现状及应用前景[J].南方电网技术,2022,16(3):1-7.

- [13] SUN K Q, XIAO H Q, PAN J P, et al. A station-hybrid HVDC system structure and control strategies for cross-seam power transmission[J]. IEEE Transactions on power systems 2021,36(1):379-388.

- [14] 蒋晓娟,姜芸,尹毅,等.上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J].高电压技术,2015,41(4):1132-1139.

- [15] 刘黎,蔡旭,俞恩科,等.舟山多端柔性直流输电示范工程及其评估[J].南方电网技术,2019,13(3):79-88.

- [16] 潘尔生,乐波,梅念,等.±420 kV 中国渝鄂直流背靠背联网工程系统设计[J].电力系统自动化,2021,45(5):175-183.

- [17] 樊云龙,任建文,叶小晖,等.基于 MMC 的渝鄂直流背靠背联网工程控制策略研究[J].中国电力,2019,52(4):96-103.

- [18] 张猛,马骢,王银岭,等.基于电路仿真法的叠装电抗器雷电冲击电压分布特性研究[J].高压电器,2020,56(12):191-195.

- [19] POSTALWAIT J. Hitachi ABB power grids wins major HVDC order linking shetland islands to the UK grid[J]. T & D World, 2020,72(10):192-204.

#### 作者简介:

雷宇(1976),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统控制及运行优化。

(收稿日期:2023-03-02)