

# ±800 kV 天中直流单极闭锁故障 近区电网暂态电压分析

张增强, 辛超山, 吕盼, 宋新甫, 付高善  
(国网新疆经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 天中直流极1发生短路引发单极闭锁故障, 极2快速转带极1功率, 主要分析直流单极闭锁的稳态以及暂态过程, 分析结果表明直流发生单极闭锁, 运行方式被迫转换为单极大地运行方式, 接地极入地电流大幅增加, 易引发近区变电站主变压器偏磁现象。另一方面直流发生短路故障, 直流电流增加, 造成换流阀消耗的无功增加, 会引发近区交流系统电压大幅下降, 有可能造成风机进入低电压穿越, 引发脱网事故。同时通过仿真分析证明随着直流传输功率的提升, 在发生短路故障时, 近区交流系统电压下降越大, 引发近区风电脱网的风险进一步增加。

**关键词:** 天中直流; 单极闭锁; 暂态电压

**Abstract:** The short circuit occurred in 1-pole of Tian-Zhong HVDC causes a unipolar blocking fault, and 2-pole turns with the power of 1-pole very fast. The steady-state and transient process of DC unipole blocking are analyzed, and the results show that when DC unipole blocking occurs, the operation mode is forced to convert to the monopolar ground operation mode, and the earth current of ground electrode increases greatly, which easily causes magnetic bias of main transformer in near-field substation. On the other hand, the DC short-circuit fault occurs, the DC current increases, resulting in the increase of reactive power consumed by the converter valve, and then it would lead to a decrease of near-field AC system voltage, which may cause the wind power units to enter into the low voltage ride through and lead to wind generator tripping off. As the same time, the simulation analysis shows that the DC transmission power is lifting, during a short-circuit fault, the more the voltage of near-field AC system drops, the greater risk of near-field wind generator tripping-off increases.

**Key words:** Tian-Zhong HVDC; unipolar blocking; transient voltage

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0058-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.011

## 0 引言

能源危机已受到世界各国的高度关注, 大力发展可再生能源已成为目前社会的当务之急。风电作为中国基本能源政策对缓解能源供应、改善能源结构、保护环境、实现和谐社会和电力工业可持续发展具有重大意义, 加快可再生清洁能源的发展和高效利用已成为中国能源领域的重点发展战略之一。新疆自然资源丰富, 可再生能源开发规模巨大, 拥有国家级千千瓦级风电基地, 新疆交流750 kV交流外送通道以及±800 kV天中直流工程的相继投运, 新疆电网正式进入特高压“交、直流混联”大电网的新格局<sup>[1-3]</sup>。在复杂大电网的时代背景下, 新疆电网特有的电压跨度大、交流网架薄弱、大功率外送以及交、直流混联等电网特点, 势必会对电网的安全稳定

运行提出较高的要求, 电网安全运行的风险与压力增大, 最终造成的电网区域稳定的耦合特性明显增加, 复杂性也明显提高。结合天中直流的投运以及新疆电网哈密地区送端网架特点, 研究天中直流故障特性, 直流发生短路故障, 直流电流增加, 造成换流阀消耗的无功增加, 会引发近区交流系统电压大幅下降, 有可能造成风机进入低电压穿越, 引发脱网事故<sup>[4-5]</sup>。同时通过仿真分析证明随着直流传输功率的提升, 在发生短路故障时, 近区交流系统电压下降越大, 引发近区风电脱网的风险进一步增加。

## 1 系统运行概况简介

天中直流近区750 kV电网如图1所示, 天中直流极1闭锁, 天山站由双极三阀组方式转换为极2低端大地方式, 故障前直流传输有功功率2480 MW。

花园电厂 2 号机运行,南湖电厂 1 号、2 号机运行,配套火电出力共计 1 174 MW,天山换流站两台联变下网有功 1 469 MW,新疆交流外送 906 MW,吐哈断面有功 692 MW。直流近区 750 kV 线路全接线运行。周边主要站点断面潮流及电压见表 1、表 2。

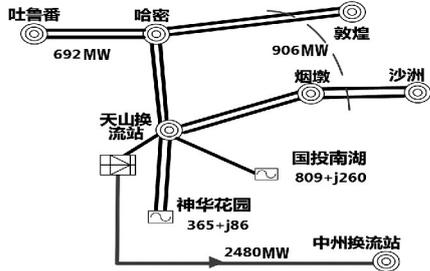


图 1 天中直流近区接线示意图

表 1 故障时刻重要元件潮流

设备名称	有功 /Mvar	无功 /Mvar	设备名称	有功 /MW	无功 /Mvar
吐哈一线	346	-140.7	1 号联变	734	99
吐哈二线	346	-145	2 号联变	735	85
哈敦一线	194.9	-80	花园 2 号机	365	86
哈敦二线	193.5	-80	南湖 1 号机	450	140
烟沙一线	258	-82	南湖 2 号机	359	120
烟沙二线	258	-80			

表 2 初始运行方式变电站电压统计

	天山换流站 /kV	哈密变 电站/kV	烟墩变 电站/kV	吐鲁番变 电站/kV
750kV 母线	760	778	777	770
500kV / 220kV 母线		234	233	233

## 2 天中直流稳态过程分析

由于天中直流中州侧极 2 高端故障检修,故障前天中直流运行方式为极 1 高低端、极 2 低端双极三阀组运行,运行电压 +800 kV、-400 kV。运行方式如图 2 所示。

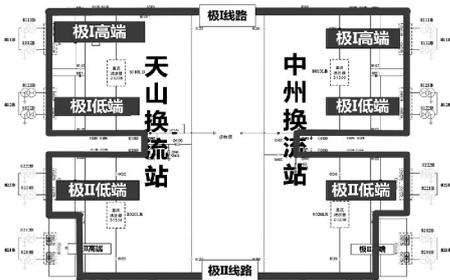


图 2 天中直流双极三阀组运行示意图

中州站因阀厅至平波电抗器间穿墙套管大雪天气闪络,造成极 1 闭锁,天中直流转为极 2 低端大地运行方式,运行电压 -400 kV。运行方式如图 3 所示。原极 1 传输功率由极 2 转带,但由于极 2 仅低端阀组运行,额定传输功率 2 000 MW,因此天中直流故障后传输功率由 2 480 MW 降至 2 025 MW,455 MW 功率涌入交流系统。

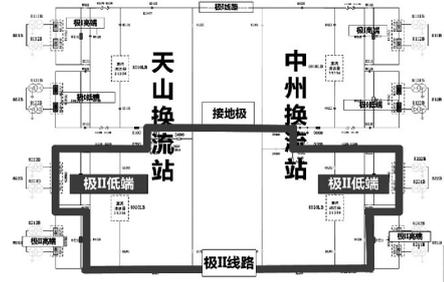


图 3 天中直流极 2 低端运行示意图

极 1 故障,直流运行方式转为单极大地方式后,接地极入地电流由 0 最大增至 5236 A,哈密地区 750 kV 哈密变电站、烟墩变电站和 220 kV 十三间房、东疆变电站主变压器中性点直流电流超过了隔直装置整定值 10 A,隔直装置均动作。由于入地电流较大,国家电力调度通信中心(以下简称国调)紧急降低天中直流功率至 1 160 MW,随着传输功率的下降,接地极入地电流降至 2 900 A,入地电流变化如图 4 所示。

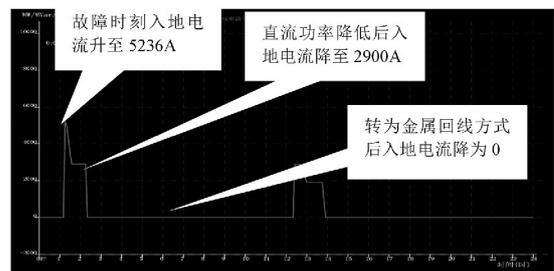


图 4 接地极入地电流变化曲线图

天中直流由单极低端对大地方式调整为单极低端对金属回线方式后,国调调整天中直流功率升至 2 000 MW。运行方式如图 5 所示。

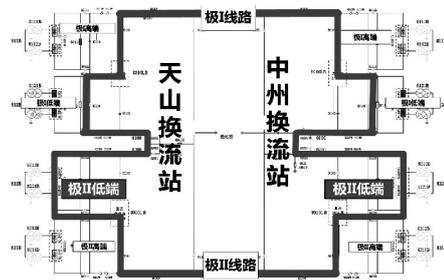


图 5 天中直流极 2 低端对金属回线运行示意图

通过 SCADA 数据分析,天中直流单极闭锁故障前后近区变电站电压无明显变化。故障前后吐哈断面潮流减小 159 MW,哈敦+烟沙潮流共增加 284 MW,与天中直流所降功率吻合,同时潮流转移比例近似 1:2。近区稳态电压变化及断面潮流变化如表 3、表 4 所示。

表 3 故障稳态过程电压变化

	天山 750 kV	天山 500 kV	哈密 750 kV	哈密 220 kV	烟墩 750 kV	烟墩 220 kV
故障前 /kV	775.5	519.6	778.0	236.4	775.5	234.4
故障后 /kV	775.6	520.1	777.7	236.9	776.4	234.5
稳态变化 /kV	0.1	0.47	-0.38	0.51	0.88	0.08

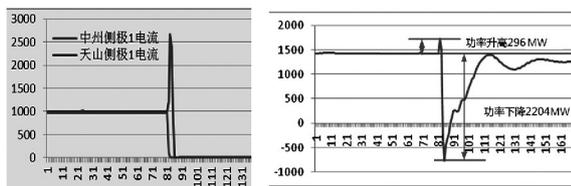
表 4 故障稳态过程断面潮流变化

	吐哈断面有功 /MW	哈敦断面有功 /MW	烟沙断面有功 /MW
故障前	679.33	420.30	512.07
故障后	520.17	537.75	679.56
稳态变化	-159.16	117.45	167.49

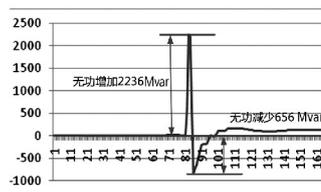
### 3 单极闭锁暂态故障仿真分析

#### 3.1 直流故障 PMU 数据分析

天中直流在中州逆变器直流侧发生接地故障,可等效为逆变器直流侧短路,交流侧开路,天山侧(整流侧)由于短路直流电流突增,中州侧(逆变侧)由于开路直流电流降为 0。天山侧在短路故障后约 60 ms 电流达到最大值,然后保护动作对极 1 进行闭锁,约经历 40 ms,故障电流降为 0。直流故障 PMU 数据如图 6 所示。



(a) 整流与逆变侧极 1 电流变化 (b) 天山换流站联变有功变化



(c) 天山换流站联变无功变化

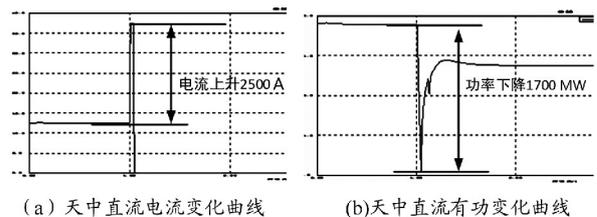
图 6 直流故障 PMU 数据

由于极 1 与极 2 线路之间存在互感作用,在故障暂态过程中,故障极极 1 电流发生剧烈变化,非故障极极 2 在互感作用下电流与极 1 保持同调趋势。在极 1 被闭锁后,极 2 在控制逻辑的指挥下,将极 1 功率转带,电流快速上升。由于故障前直流输送功率大于极 2 额定传输功率(极 2 高端换流阀停运,额定功率 2 000 MW),稳态时极 2 无法全部转带极 1 功率;但为减小对交流电网的冲击,控制逻辑允许每个换流阀拥有暂时(约 3 s) 1.3 倍过负荷能力,因此极 2 将极 1 功率全部转带后,经历约 3 s,电流下降至额定电流。

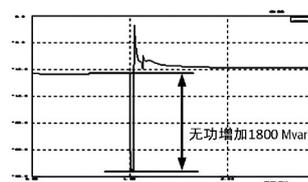
#### 3.2 直流故障仿真分析

根据故障情况设置仿真故障:天中直流中州侧设置单极接地故障,故障持续 40 ms,天中直流极 1 闭锁,再经过 40 ms 后极 2 转带极 1 功率。

直流故障仿真数据如图 7 所示,仿真结果表明,在直流发生短路故障时,直流送端电流突增,直流消耗的无功功率增加,仿真结论与 PMU 录波数据基本吻合。但仿真结果中未出现直流功率增加过程,与实际录波曲线存在差异。



(a) 天中直流电流变化曲线 (b) 天中直流有功变化曲线



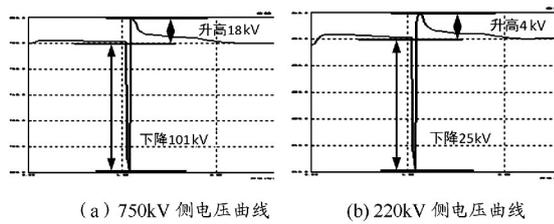
(c) 天中直流无功变化曲线

图 7 直流故障仿真数据

#### 3.3 直流近区电压潮流仿真分析

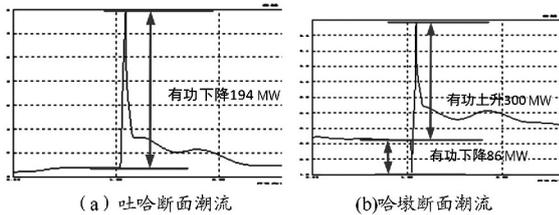
短路过程直流近区 750 kV 母线电压下降 101 kV, 220 kV 母线电压下降 25 kV。直流单极闭锁后 750 kV 母线电压升高 18 kV, 220 kV 母线电压升高 4 kV。

短路过程中吐哈断面潮流不变,哈敦+烟沙断面有功减少 194 MW,直流单极不锁后,吐哈断面有功减少 654 MW,哈敦+烟沙断面有功增加 720 MW,潮流转移比接近 0.9。仿真结果如图 8、图 9 所示。



(a) 750kV 侧电压曲线 (b) 220kV 侧电压曲线

图8 哈密750 kV 变电站压仿真曲线

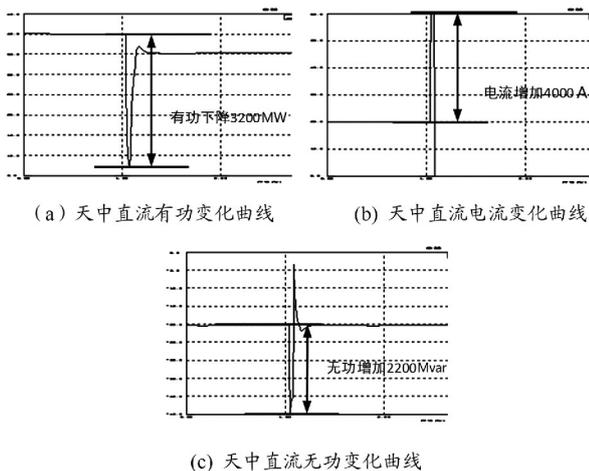


(a) 吐哈断面潮流 (b) 哈墩断面潮流

图9 直流近区潮流变化曲线

### 3.4 灵敏度分析

将直流输送功率提升至4 000 MW 模拟仿真单极接地闭锁故障。仿真结果如图10所示,仿真结果表明 随着直流输送功率的增加,在发生接地故障时,直流电流增加幅度变大,故障期间直流所消耗的无功更大。因此直流接地故障时,近区交流电压更低,有可能造成风机进入低电压穿越状态,引发风机脱网事故。



(a) 天中直流有功变化曲线 (b) 天中直流电流变化曲线

(c) 天中直流无功变化曲线

图10 直流故障敏感性分析曲线

## 4 结论

直流在逆变换流阀直流侧发生接地故障,整流侧故障极电流突增,换流阀消耗的无功功率增加,从而从交流系统吸收的有功无功功率增加,直流近区交流系统电压下降。直流单极闭锁后,原直流消耗的有功、无功功率减少,涌入交流系统,造成交流系统有功潮流转移以及电压升高。直流另外一极将功率转带后,交流

系统恢复初始运行状态。

发生单极闭锁故障,直流系统将转换为单极大地回线运行方式,接地极入地电流较高,有可能引发近区变压器故障,应提前做好防范措施。

天中直流传输功率2 500 MW 时,发生单极闭锁故障,暂态过程电压降低及升高均在允许范围内,不会造成风机大面积脱网事故。当另外一极将功率转带后,系统电压及潮流基本能恢复初始值,对系统稳定运行影响较小。

仿真结果表明随着直流输送功率的增加,在发生接地故障时,直流电流增加幅度变大,故障期间直流所消耗的无功更大。因此直流接地故障时,近区交流电压更低,有可能造成风机进入低电压穿越状态,引发风机脱网事故。

### 参考文献

- [1] 关洪浩,张锋,孙谊焯,等.哈郑直流工程投运初期对新疆电网影响分析[J].中国电力,2012,45(12):48-51.
- [2] 钟胜,郭相国,田昕,等.哈密至郑州特高压直流对受端电网影响分析[J].中国电力,2012,45(11):47-51.
- [3] 王衡,姚秀萍,常喜强,等.特高压直流故障对风电场送出可靠性的影响及改进措施[J].电工电气,2014(5):29-33.
- [4] 郑超,汤涌,马世英,等.网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究[J].中国电机工程学报,2014,34(1):115-122.
- [5] 杨海涛,丁茂生,宋新立,等.电力系统动态稳定机理和稳定措施分析[J].电力系统自动化,2008,32(14):35-39.
- [6] 李惠军,郭颖,蓝海波,等.±800 kV 复奉特高压直流送端电网安全稳定控制系统[J].江苏科技信息,2011(9):39-41.
- [7] 杨建设,张佳丽,锡盟“风火打捆”的风电运用方式研究[J].风能,2011(7):36-38.
- [8] 常喜强,樊艳芳,钟显,等.高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究[J].四川电力技术,2014,37(6):5-9.
- [9] 李国栋,皮俊波,郑力,等.±500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J].电网技术,2014,38(4):877-882.
- [10] 陈树勇,逢博,陈得治,等.新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J].中国电力,2014,47(4):102-107.

作者简介:

张增强(1979) 硕士、工程师,从事电网规划相关工作。

(收稿日期:2016-05-29)