

# 新能源汇集的多端柔性直流系统运行方式 及控制策略分析

周登钰<sup>1,2</sup>, 张新燕<sup>2</sup>, 赵理威<sup>3</sup>, 王开泽<sup>1</sup>, 孙凯<sup>4</sup>, 王志浩<sup>2</sup>

(1. 国网武威供电公司, 甘肃 武威 733000; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;  
3. 国网昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100; 4. 北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100175)

**摘要:** 针对新能源消纳与功率外送受限问题, 通过分析新能源基地分布的形态, 研究能源基地采用多馈入电压源型直流输电并网, 然后经电流源型直流输电通道外送的多端柔性直流系统结构。并根据多端柔性直流系统的运行方式分析送受端换流站的控制策略, 实现系统功率的协调分配以及系统的灵活运行。最后通过 DIgSILENT 建模仿真, 验证系统的稳定性和控制策略的有效性。

**关键词:** 功率外送; 区域性能源; 多端柔性直流系统; 运行方式及控制策略; 建模仿真

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0035-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.008

## Analysis on Operation Mode and Control Strategy of Multi-terminal Flexible DC System in Renewable Energy Collection

Zhou Dengyu<sup>1,2</sup>, Zhang Xinyan<sup>2</sup>, Zhao Liwei<sup>3</sup>, Wang Kaize<sup>1</sup>, Sun Kai<sup>4</sup>, Wang Zhihao<sup>2</sup>

(1. State Grid Wuwei Electric Power Supply Company, Wuwei 733000, Gansu, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China;

3. State Grid Changji Electric Power Supply Company, Changji 831100, Xinjiang, China;

4. Beijing Gold Wind Science & Creation Wind Power Equipment Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** Aiming at the limits of renewable energy accommodation and power delivery, the distribution form of renewable energy base is analyzed, the multi- infeed voltage source converter based DC transmission (VSC) grid is studied, and then the structure of multi-terminal flexible DC system delivered by line commutated converter based DC transmission (LCC) channel is also studied. According to the operation mode of multi-terminal flexible DC system, the control strategy of converter station in sending end and receiving end is analyzed, and the coordinated distribution of system power and the flexible operation of the system are realized. Finally, through DIgSILENT modeling simulation, the stability of the system and the effectiveness of the proposed control strategy are verified.

**Key words:** power delivery; regional energy; multi-terminal flexible DC system; operation mode and control strategy; modeling simulation

## 0 引言

由于中国能源的分布不匀, 能源中心和负荷中心逆向分布, “三北”、蒙西等新能源聚集区域, 新能源消纳问题日益严重, 功率外送亟待解决。但新能源的消纳受输电通道、自身波动性等因素制约, 导致弃电严重, 外送受限<sup>[1]</sup>。随着柔性直流输电技术的不断发展, 新能源通过多端柔性直流系统外送是解决区域性新能源消纳问题的有效措施和保证新能源

有效利用及可持续发展的重要战略<sup>[2-4]</sup>。

柔性直流输电技术是构建灵活运行、高效输电并充分利用可再生能源的直流输电系统的有效途径, 是未来直流输电技术的发展方向<sup>[5]</sup>。因此“三北”、蒙西区域等各能源基地通过 VSC-HVDC 并网是解决区域性风光基地送电问题的一种最优策略。文献[6]中介绍了一种并联结构的四端直流输电系统, 只对四端系统进行仿真, 没有考虑在系统不同运行方式下的控制策略。文献[7]提出多端柔性直流系统的不同控制策略, 但是否适用于弱交流系统还

需进一步分析。文献[8]提出了多端直流系统的不同拓扑结构,并建立了相应的柔性直流系统进行了仿真验证。文献[9-13]研究了风电、光伏电场直流并网的拓扑结构和控制策略。文献[14]研究了直流系统故障的诊断和故障抑制的控制策略。文献[15-16]研究了一种换流站之间的同步切换策略,不能够有效地抑制在直流侧故障下电压的波动。文献[17]研究了一种适用风电并网的环形六端直流系统,该系统在交流系统较强的情况下较稳定,但不适合“三北”荒芜地区。文献[18]研究了大型风电基地功率外送的多端直流系统控制策略,该拓扑结构简单,系统缺乏灵活运行的方式。

下面在上述研究的基础上针对“三北”蒙西地区的区域性能源分布形态,提出新能源基地采用多馈入电压源型直流输电并网,然后经电流源型直流输电通道的多端柔性直流系统结构实现跨省功率外送;并根据系统的运行方式分析了送受端换流站的控制策略,然后通过DIGSILENT建模仿真系统的运行特性,主要分析了在系统不同运行方式下控制策略对多端柔性直流系统的功率波动频率、电压、电流稳定性的影响。

## 1 多端柔性直流输电基本原理

多端柔性直流系统主要由换流站和直流输电线路构成,其柔性直流输电系统结构如图1所示。

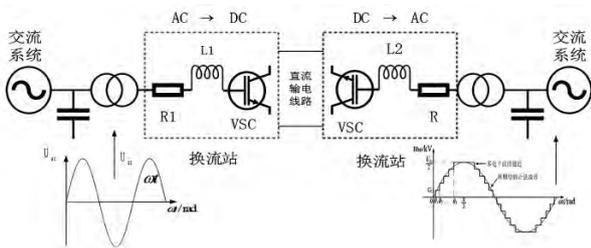


图1 柔性直流输电系统结构

多端柔性直流系统中换流站可以根据所处送受端的位置来决定其工作在整流状态还是在逆变状态。系统通过对各换流站电压源换流器(voltage source converter, VSC)的控制就能实现在直流系统两端交流系统之间有功和无功的传输<sup>[19]</sup>。

多端柔性直流输电系统的核心是换流站(电压源型)。若在不考虑阀电抗器的损耗以及谐波分量时,取 $U_s$ 为变流系统电压的基波分量; $U_c$ 为换流站交流侧电压的基波分量; $\delta$ 为 $U_s$ 和 $U_c$ 之间的相角

差;双极直流母线电压差为 $U_d$ ;  $X_L$ 为相电抗器的电抗。则可得到:

$$U_c = \frac{M\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}U_d \angle(\delta_s - \delta) = \frac{\mu M}{\sqrt{2}}U_d \angle(\delta_s - \delta) \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为直流电压的利用率; $M$ 为调制比,即VSC输出相电压峰值与单极直流电压的比值。功率转移电路如图2所示,图中: $P_s$ 、 $Q_s$ 分别为变流系统的有功和无功; $P_c$ 、 $Q_c$ 分别为换流站输出的有功和无功。

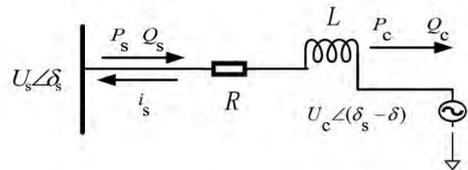


图2 功率转移电路

从交流系统看进去,则可计算出换流站与交流系统之间传输的有功功率 $P$ 和无功功率 $Q$ 为

$$P = \frac{U_s U_c \sin \delta}{X_L} = \frac{K^2 U_s \sin \delta}{X_L} \quad (2)$$

$$Q = \frac{U_s (U_c - U_c \cos \delta)}{X_L} = \frac{U_s^2 (1 - K \cos \delta)}{X_L} \quad (3)$$

式中 $K$ 为换流站输出电压增益,是 $U_c$ 与 $U_s$ 的比值,与 $M$ 定义不同,但均能反应换流站输出电压的变化。由式(2)可以看出 $\delta$ 的变化影响传输的有功功率;由式(3)可以看出 $U_c$ 的变化影响传输的无功功率。因此通过控制 $\delta$ 、 $U_c$ 就可以控制直流电流的方向及传输有功功率及无功功率的大小。从交流系统看进去,VSC可等效于一个端电压幅值、相角均可控的无旋转惯量的同步发电机。

## 2 系统概述

所提出的能源基地采用多馈入电压源型直流输电(VSC)并网,然后经电流源型直流输电(line commutated converter, LCC)通道外送形成多电源供电、多通输电的多端柔性直流系统结构,如图3所示。新能源并网经过换流站VSC1、VSC2、VSC3、VSC4、VSC5,形成五端柔性直流输电系统来增加风光功率的外送。五端柔性系统中有部分换流站公用直流输电通道,节省线路成本和损耗,更加经济。

## 3 运行方式

所研究的主要的运行方式是将VSC5作为受

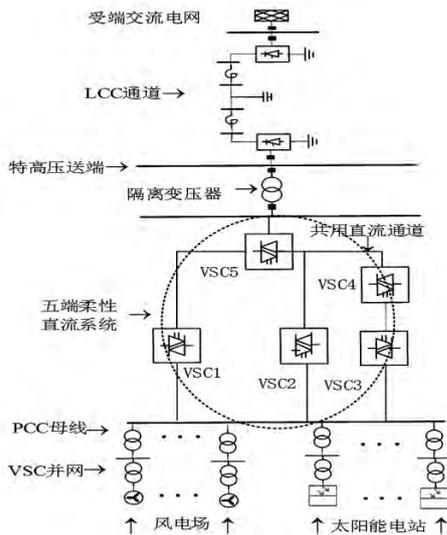


图 3 多端树枝式柔性直流系统拓扑

端,其他四端 VSC1、VSC2、VSC3、VSC4 作为送端。为提高五端系统的运行灵活性,系统还可以有其他运行方式,分为五端、四端、三端、二端和 STATCOM 5 类共 10 种运行方式,具体如表 1 所示。

表 1 系统运行方式

分类	运行方式	运行的换流站	换流站直流功率和 /MW
五端系统	1	VSC1、VSC2、VSC3、VSC4、VSC5	2000
	2	VSC1、VSC2、VSC4、VSC5	1800
四端系统	3	VSC2、VSC3、VSC4、VSC5	1600
	4	VSC1、VSC2、VSC5	1400
三端系统	5	VSC2、VSC4、VSC5	1600
	6	VSC3、VSC4、VSC5	1400
二端系统	7	VSC1、VSC5	1400
	8	VSC2、VSC5	1200
	9	VSC4、VSC5	1200
STATCOM	10	5 个换流站完全独立,VSC1、VSC2、VSC4、VSC5 可以在 STATCOM 方式	0

将这 10 种运行方式再归类划分为交直流并联(有源 HVDC)、单换流站直流孤岛(无源 HVDC)、多换流站直流孤岛(无源 HVDC)、单换流站 STATCOM(静止无功补偿器)4 类运行方式。

交直流并联方式(有源 HVDC):所研究的五端柔性直流系统,换流站 VSC1、VSC2、VSC3、VSC4、作为整流站运行,VSC5 作为逆变站运行,形成五端柔性直流输电系统,主要的运行方式就是交直流并联方式,通过直流线路和交流线路共同联网供电。

单换流站直流孤岛方式(无源 HVDC):当换流

站 VSC1、VSC2、VSC3 交流侧电网与交流主网联络线故障断开只留下孤立的供电连接线路时,则换流站 VSC1、VSC2、VSC3 处于单换流站直流孤岛方式,对局部的电网进行调频和调压。

多换流站直流孤岛方式(无源 HVDC):当换流站 VSC1、VSC2 交流侧电网与交流主网联络线故障断开时,换流站 VSC2、VSC4 可以采用多换流站直流孤岛方式;换流站 VSC1、VSC4 交流侧电网与交流主网联络线故障断开时,换流站 VSC1、VSC2 可以采用多换流站直流孤岛方式;换流站 VSC1、VSC3 交流侧电网与交流主网联络线故障断开时,换流站 VSC1、VSC2、VSC4 采用多换流站直流孤岛方式。

STATCOM 方式:是指柔性直流换流站与交流系统有电气连接,而与其他换流站通过直流线路的电气连接断开的运行方式。5 个换流站完全独立时换流站 VSC1、VSC2、VSC4、VSC5 运行在 STATCOM 方式,主要用来调节系统无功。

## 4 控制方式

### 4.1 控制模式分析

柔性直流系统稳定运行的基础是保证直流电压的稳定,直流网络功率大幅波动引起的直流电压异常会导致换流站过流闭锁,情况比较严重的可能会因单个换流站引起整个直流系统的故障和瘫痪。多端柔性直流系统受端电网侧为有源交流网络,通常采用定直流电压控制方式,能提高交流系统的电压稳定性。定直流电压控制的具体控制框图如图 4 所示,首先是电压的参考值与实际电压的测量值进行比较得到一个偏差量,然后 PI 控制器对偏差量进行调节后再通过对电流的限幅产生一个电流的参考值  $i_{dref}$ 。此参考电流作为内环电流控制的参考值。在多端柔性系统正常运行时换流站中必须有一个采用定直流电压控制的换流站,该多端柔性直流系统是以换流站 VSC5、VSC1、VSC2、VSC4、VSC3 的依次顺序优先选择定直流电压控制方式。

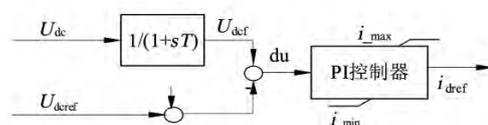


图 4 定直流电压控制

当多端柔性系统中五端换流站 VSC1、VSC2、VSC3、VSC4、VSC5 独立运行时,换流站 VSC1、

VSC2、VSC4、VSC5 运行于 STATCOM 方式,系统换流站亦采用定直流电压控制。除定直流电压控制的换流站之外的换流站采用定有功控制。

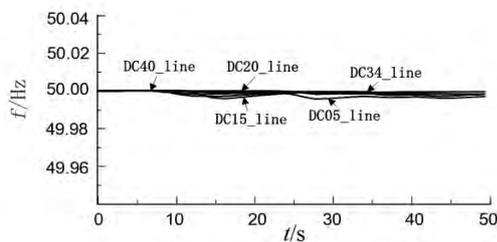
#### 4.2 静态真分析

所研究的多端系统中,风电建模选取容量为 5 MW 的双馈风机,各个换流站之间的距离选取为 100 km,其他建模参数如表 2 所示。以最复杂的五端运行方式为例进行仿真分析。

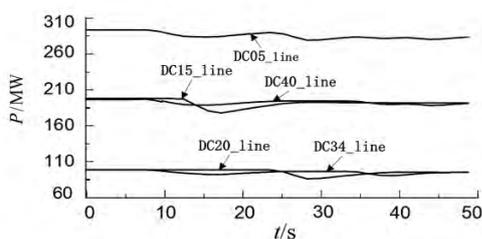
表 2 系统设备参数

设备	VSC5	VSC1	VSC2 ~ VSC4
交流电压/kV	320	110	110
换流站 无功补充/Mvar	900	360	180
换流站 额定功率/MW	1000	400	200
直流线路 电压等级/kV	±150	±150	±150

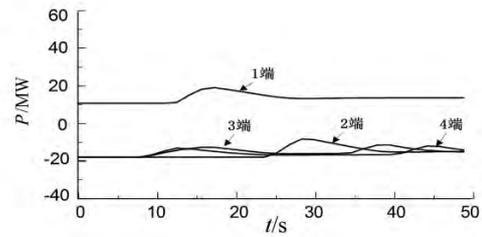
五端柔性直流输电系统正常运行时的特性曲线如图 1 所示。在没有故障情况下,最大容量的风光基地 1 风场风速在 10 s 时减小至 8 m/s 持续 6 s 后风速恢复到 11 m/s,系统有功功率下降如图 4(b) 所示。系统采用定直流电压控制,送端换流站 VSC1、VSC2、VSC3、VSC4 进行无功补偿保证系统功率的平衡如图 4(c) 所示,进而稳定直流电压、电流,如图 4(d)、图 4(e) 所示,避免风电场风电机组脱网。在风速波动时,系统定频率控制让各直流通道的运行频率稳定在 50 Hz 左右,如图 4(a) 所示。综上仿真分析,验证了所提出的控制策略可以有效地控制新能源的波动对系统稳定性的影响,保证系统电压和功率的稳定。



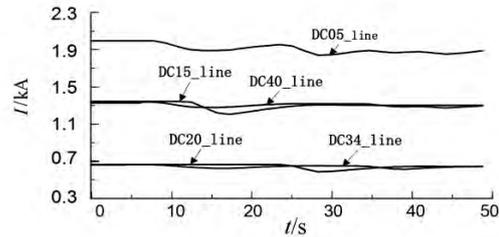
(a) 直流通道输电频率



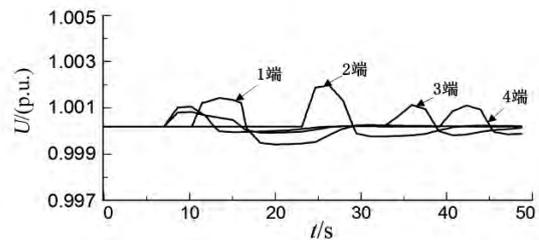
(b) 直流通道输电功率



(c) 系统送端有功功率



(d) 直流通道时序电流



(e) 直流通道时序电压

图 5 系统正常情况动态特性

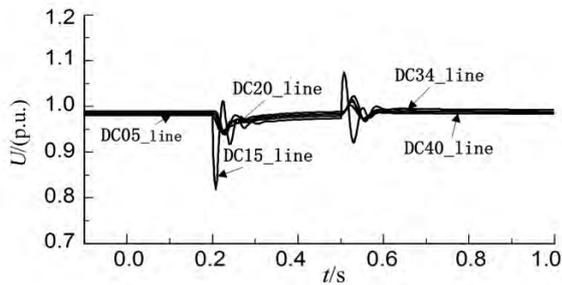
#### 4.3 故障扰动仿真分析

多端柔性直流输电系统输出功率和输入功率是否平衡是系统运行的重要因素,当输入功率和输出功率不平衡时,就会直接影响直流电压的波动,使系统不能正常运行。同样,以最复杂的五端运行方式为例进行仿真分析。

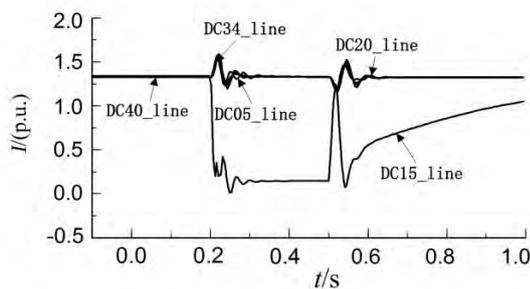
由于换流站 VSC1 是在五端柔性直流系统中 4 个送端 VSC1、VSC2、VSC3、VSC4 中容量最大的一个,潮流对整个系统的影响相对较大。选在能源基地 1 公共连接点汇流母线处设置三相故障,来研究系统在故障扰动下的运行特性。设置在 0.2 s 时刻发生故障,然后在 0.5 s 时刻清除故障,故障持续 0.3 s,在 1 s 时刻仿真结束。在发生故障后风电基地功率无法正常输送功率,送端换流站 VSC1 输出的功率也随之减少,进而导致了受端换流站接受的功率也减少,如图 5(c) 所示。换流站 VSC1 与 VSC5 之间的直流通道 DC15\_line 在故障时刻,功率发生大幅下降,如图 5(d) 所示。与此同时,故障也造成五端直流系统的电压、电流发生如图 5(a)、5(b) 所示的振荡,当电压振荡幅度超过系统稳定运行时的电

压范围,风电场侧的换流站将采用恒压变频控制,通过调节输入功率来达到对系统功率波动的调节。到0.5 s时将故障完全切除,系统中送端换流站容量最大的VSC1,采用定直流电压控制来保证系统直流电压的稳定,剩下其他的送端换流站采用定有功功率控制来保证系统有功功率的平衡。

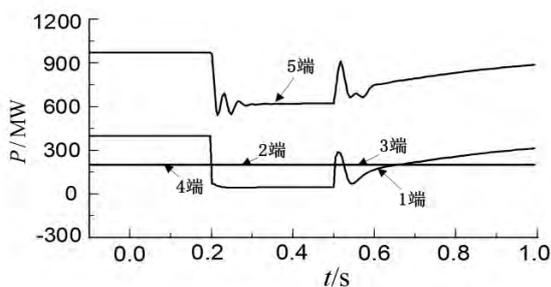
基地采用VSC并网、LCC通道外送的系统结构,并根据拓扑结构对系统的运行方式和控制策略进行了研究分析,通过DIgSILENT建模仿真系统在五端运行时的情况,验证了所提的控制策略在系统五端运行方式下仍然可以保证系统的稳定运行。系统稳态运行时,系统各节点电压波动不大,维持在1.0 pu附近,当能源基地1公共连接点发生故障,系统电压跌落近0.25 pu,系统定直流电压控制和定有功功率控制来保证系统电压和有功功率的平衡。



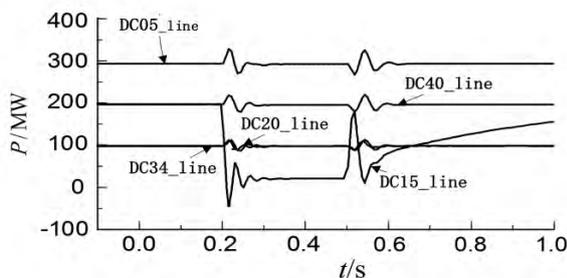
(a) 直流通道时序电压



(b) 直流通道时序电流



(c) 系统各端功率



(d) 直流通道输电功率

图6 系统故障情况下动态特性

### 参考文献

- [1] 周强,汪宁渤,何世恩,等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] 刘振亚,张启平,董存,等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [3] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [4] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [5] 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.
- [6] 李少华,王秀丽,张爱玲,等. 并联换流器高压直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015(21): 132-137.
- [7] 陈树勇,徐林岩,孙栩,等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增1): 32-38.
- [8] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015(15): 145-153.
- [9] 王常骥,郭家虎. 风电场直流并网的拓扑结构研究[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3065-3070.
- [10] 吕敬,施刚,蔡旭,等. 大型风电场经VSC-HVDC交直流并联系统并网的运行控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 639-646.
- [11] 范心明,管霖,夏成军,等. 风电场交直流混合输电并网中VSC-HVDC的控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4781-4790.
- [12] 王岩,魏林君,高峰,等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.

(下转第62页)

## 5 结语

前面结合了新能源基地分布的形态,研究能源

变电站内 3 号主变压器 303 断路器 B 相 CT 绝缘击穿并接地, BC 相发生两点接地短路故障, 该线路 C 相故障电流达到保护动作定值, 保护正确动作跳开 352 断路器。3 号主变压器 303 断路器 B 相 CT 因制造工艺问题, 在线路故障时绝缘击穿发生接地故障并引发主变压器差动保护区外的相间短路, 因 CT 受损故障电流波形畸变并达到差动保护定值导致 3 号主变压器差动保护出口。

2) 事故 CT 生产工艺存在问题, 内部长期局部放电, 破坏本身绝缘水平。但在事故前一年的预试工作中, 高压试验数据均正常, 暴露出预试手段不足的缺点。

3) 事故初始分析过程中, 从波形图的电压量来看, 疑似发生 B 相接地, 但 C 相电压仍保持正常相电压水平, 且电压异常的同时 303 断路器 B、C 相有故障电流, 即单相接地故障电气特征在故障录波图上没有反映, 给事故分析带来一些困扰。最终将起始时刻波形放大观察发现 C 相接地故障先持续约 0.5 ms, 再导致 B 相接地。

4) 通过计算差流的方式证明了 CT 故障点在差动保护范围以外。

参考文献

[1] 袁文嘉. 一起区外故障引起主变差动保护动作的分

(上接第 39 页)

[13] 葛廷利, 宁博扬, 陈金辉. 受端多端的混合直流系统输送风电的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 191-195.

[14] Yao Z, Zhang Q, Chen P, et al. Research on Fault Diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 8.

[15] 付强, 杜文娟, 王海风, 等. 多端柔性直流输电中换流站的同步切换控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1241-1250.

[16] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.

[17] 李程昊, 詹鹏, 文劲宇, 等. 适用于大规模风电并多

析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 130-132.

[2] 蒋佳. 10 kV 线路故障引起主变差动保护动作的分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 13-14.

[3] 尹迪迪. 220 kV 桂湘线跳闸故障原因分析及建议[J]. 广西电力, 2011, 34(5): 80-82.

[4] 刘建明. 一起线路跳闸造成 500 kV 变电站交流系统失压事故的分析[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(4): 78-82.

[5] 曾新雄, 李新海, 曾庆祝, 等. 10 kV 开关柜内部电弧故障的危害与保护[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 67-71.

[6] 王义平. 主变压器变损率对电气设备潜在性故障的预判特性[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 82-86.

[7] 王斯斯, 刘宇, 熊俊, 等. 一起 500 kV 电容式电压互感器电容击穿故障分析[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 126-130.

[8] 国电南京自动化股份有限公司. WBZ-500H 变压器保护装置说明书[Z]. 2006.

[9] 余剑锋, 陈汝锦. 厦门 500kV 变电所“3·25”事故剖析[J]. 电力建设, 2000, 2(34): 125-130.

作者简介:

苟小刚(1986), 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护设备检修工作;

段然(1989), 本科, 工程师, 从事电力系统变电运行工作。

(收稿日期: 2019-10-24)

端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 1-7.

[18] 孙文博, 徐华利, 付媛, 等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1596-1601.

[19] 乐波, 梅念, 刘思源, 等. 柔性直流输电工程基本原理及概念设计[J]. 中国电机(技术版), 2014(6): 73-76.

作者简介:

周登钰(1994), 硕士研究生, 主要研究方向为高压柔性直流输电技术研究;

张新燕(1964), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术研究。

(收稿日期: 2019-09-15)