

## 基于广域连接的广东地区接地极连接方案研究

高嘉, 郑智慧, 熊纽, 简翔浩, 陈硕

引用本文:

高嘉, 郑智慧, 熊纽, 等. 基于广域连接的广东地区接地极连接方案研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 115-122.

GAO Jia, ZHENG Zhihui, XIONG Niu, et al. Research on Connection Scheme of HVDC WAN Grounding Electrode In Guangdong Based on Wide-Area Connection[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 115-122.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 独立接地极改造为共用接地极方案研究

Research on the Plan of Independent Earth Electrode Reconstructed to Common Earth Electrode

南方能源建设. 2015(3): 112-117 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.022>

#### ±800kV极导线与接地极线共塔线路耐雷性能及双极闭锁反事故措施分析

Analysis on the Lightning Performance and Anti-accident Measures of ±800 kVBipolar Blocking of Polar Wires and Electrode Wires on the Same Tower

南方能源建设. 2018, 5(4): 86-91 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.013>

#### 垂直型直流接地极设计探讨

Discussion on DC Vertical Ground Electrode Design

南方能源建设. 2016, 3(4): 60-63 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.012>

#### 垂直型直流接地极的电极结构对溢流密度的影响

Influence of HVDC Vertical Earthing Electrode Structure on Current Releasing Density

南方能源建设. 2018, 5(z1): 71-76 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.013>

#### 换流站电气二次若干设计浅谈

Several Design Discussion for Converter Station Secondary Electrical

南方能源建设. 2016, 3(z1): 112-115 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.024>

# 基于广域连接的广东地区接地极连接方案研究

高嘉<sup>1</sup>, 郑智慧<sup>2</sup>, 熊纽<sup>3</sup>, 简翔浩<sup>2,✉</sup>, 陈硕<sup>2</sup>

(1. 南方电网超高压输电公司, 广州 510670; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510633;  
3. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510670)

**摘要:** [目的] 为解决高压直流输电工程中接地极在广东地区选址困难问题, 研究将现有接地极连接组成广域接地极供未来直流工程接入, 减少对极址周围电气设施、地下金属管道设施的影响。[方法] 分析了现有接地极作为子接地极组成广域接地极的可行性, 提出几种典型的广域接地极应用场景, 并进行了各子接地极的自然分流计算、均流计算和多回直流同时运行工况计算。[结果] 广域接地极能降低粤东极址的设计要求, 缓解鱼龙岭接地极对油气管道和周边电力系统的影响, 具有实施的可行性。但在不增加均流电阻的情况下, 效益仍不明显。[结论] 该研究为通过采用广域接地极, 降低新建接地的难度提供思路和方法。

**关键词:** 高压直流输电; 广域接地极; 自然分流计算; 均流计算

中图分类号: TM7; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)04-0115-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Connection Scheme of HVDC WAN Grounding Electrode In Guangdong Based on Wide-Area Connection

GAO Jia<sup>1</sup>, ZHENG Zhihui<sup>2</sup>, XIONG Niu<sup>3</sup>, JIAN Xianghao<sup>2,✉</sup>, CHEN Shuo<sup>2</sup>

(1. Extra High Voltage Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510670, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510633, China;

3. Extra High Voltage Power Transmission Company, CSG, Maintenance Test Center, Guangzhou 510670, China)

**Abstract:** [Introduction] To solve the problem of difficult site selection for grounding electrodes in HVDC transmission projects in Guangdong, this paper analyzes the connection of existing grounding electrodes to form a WAN grounding electrode for future DC project access to reduce the impact on electrical facilities and underground metal piping facilities around the electrode site. [Method] The feasibility of forming a wide-area grounding electrode by using existing grounding electrodes as sub-grounding electrodes was analyzed, several typical application scenarios of WAN grounding electrodes were proposed, and the natural shunted current calculation, current distribution averaging and multiple DC simultaneous operation conditions of each sub-grounding electrode were carried out. [Result] WAN grounding electrode can reduce the design requirements of Yuedong pole site and mitigate the impact of Yulongling grounding electrode on oil and gas pipeline and surrounding power system, and has the feasibility of implementation. However, the benefits are still not obvious without adding any current averaging resistors. [Conclusion] This study provides ideas and methods to reduce the difficulty of constructing new grounding electrodes by using WAN grounding electrodes.

**Key words:** HVDC transmission; WAN grounding electrodes; natural shunted current calculation; current distribution averaging

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

随着西电东送和全国联网的稳步推进, 我国直流输电正朝着高电压、大容量的方向发展, 直流落

点越来越多, 系统额定电流也逐步提高, 参照传统的常规方式设置接地极, 导致选址工作变得愈加困

收稿日期: 2021-01-05 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目“新型接地极技术及其环境影响研究”(CEEC2016-KJ09)

难。一方面,我国负荷多集中在东部以及南部沿海经济发达地区,人口密集,受接地极影响的设施多,尤其是电力系统和油气管道,交流电力系统复杂,油气管道密集,造成接地极选址受限。另一方面,在电源集中的西部地区,山地面积大,受地理条件的制约,寻找面积大,适合埋设接地极的平地较困难<sup>[1-2]</sup>。

南方电网直流输电工程的受端大部分落点在广东,是我国特大省级电网之一。该网络结构复杂、负荷大、电力元件众多。而珠三角地区经济发达,人口密度大,电网结构复杂,油气管道金属设施众多,使得接地极选址受到很大的限制。送端换流站多位于云南,属于高山地貌,区域地形峰峦叠嶂、山势陡峻、山高谷深坡陡,地形地质条件复杂,局部地带有平坝,范围不大且多呈现长条形分布,由于平坝区域障碍设施较多,也不利于接地极选址。

近年来已采取共用接地<sup>[3]</sup>、垂直接地极<sup>[4-5]</sup>、深井接地<sup>[6]</sup>等新型接地技术,部分解决了接地极选址难、建设难的问题,本文提出基于广东省内现有接地极组成广域接地极方案,实现接地极系统方案的创新和设计技术的发展。

## 1 广域接地极概述

广域接地极有别于狭义上常规的独立接地极或共用接地极,即接地极不限于一个接地点或接地点,而是在一定区域内但凡现实中具备可行性的处于不同极址的多个独立接地极通过电气连接组成广域范围内的并联接地极系统,系统单极运行电流可通过这些不同接地体在不同地点散流,形成一个广域范围内的接地极系统<sup>[1]</sup>。

广域接地极可将一回直流单极大地回线运行电流由多个子接地极分担<sup>[7-8]</sup>,较常规接地极减小了单个极址的电磁效应<sup>[9]</sup>,在降低新极址的设计要求和缓解现有接地极对油气管道和周边电力系统的影响有良好的效果<sup>[10]</sup>。

## 2 广域接地极组成方案

目前,广东地区南方电网已投运的直流线路共有8回,投运的接地极共有6个,其中2个为两回直流共用。对广东省内已建的各接地极是否可作为广域接地极连接分析情况如表1所示。

表1 接地极作为广域接地极连接可行性分析

Tab. 1 Feasibility analysis of existing grounding electrode as DC WAN grounding electrodes

接地极	额定电流/A	广域接地极连接可行性分析
莘田接地极	1 800	位于珠三角地区,周边电力设施众多,且额定电流较小,暂不考虑作为广域接地极。
天堂接地极	3 000+ 3 125	周边电力设施和管道已治理,可考虑作为广域接地极。
鱼龙岭接地极	3 000 3 125	有作为广域接地极的需求,周边油气管道和变电站较密集 <sup>[10]</sup> 。
田源1+田源2 接地极	3 125 3 125+3 125	满足广域接地极接入条件,可考虑作为广域接地极。
观音阁接地极	3 000	国家电网管理,作为广域接地极接入协调工作量大。
新村接地极	3 200	距离西气东输二线管道距离较近,目前接地极闲置,可作为组成广域接地极的终端子接地极,在保证安全的情况下分担部分入地电流 <sup>[11]</sup> 。

根据后续的直流送电规划,换流站落点分别为珠江三角洲东部和西部地区,各2个站址(以下分别简称东1、东2、西1、西2换流站)。根据初步的接地极选址,粤西北地区接地极极址条件较好,新选极址有条件按照共用接地极建设,满足后珠江三角洲西部后续新增2回直流的需求。同时,现有的天堂接地极有接入新直流的条件<sup>[12]</sup>。

粤西地区可满足西部两换流站的选址要求,粤东地区选址较为困难,满足两回直流接入的共用接地极的极址更少<sup>[13]</sup>,因此有采用广域接地极连接,以满足珠江三角洲东部2回直流接入的需求。以下分为有粤东接地极和无粤东接地极两种情况,考虑广域连接。

广东境内(包括计划建设的粤东新接地极)各接地极其地理位置分布如图1所示。

作为广域接地极的四个子接地极从地理位置比较分散,东1、东2换流站距离近,但距离各接地极线路都较远,考虑采用顺序连接方式或拓扑连接方式组成广域接地极网络,接地极与东部换流站按照就近原则接入。田源接地极和粤东接地极距交流电网负荷中心较远,对交流电网影响相对较小,可作为东1、东2换流站的接入端<sup>[13]</sup>。天堂接地极与东部换流站之间相隔珠江口,不能直接连接,通过鱼龙岭接地极或者田源接地极作为中部换流站的接



图 1 换流站与接地极地理位置分布图

Fig. 1 Geographic distribution map of converter station & grounding electrodes

入端间接连接, 换流站与接地极距离见图 2。

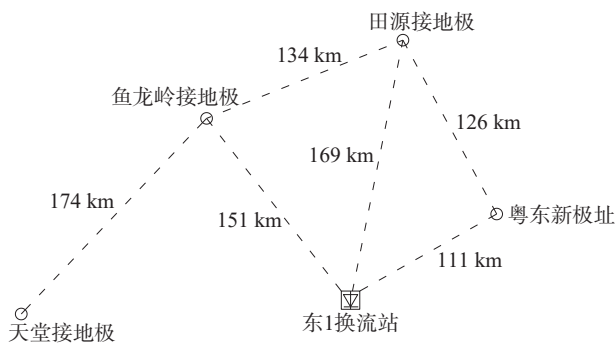


图 2 换流站与接地极系统地理分布示意

Fig. 2 Geographic demo for converter station & grounding electrodes

从换流站到接地极的导流引线暂定型号为 LGL—630/55, 25℃环境下, 导线电阻约为 0.011 3 Ω/km。由接地极系统地理分布位置来看, 各接地极地理位置较为分散, 土壤分层情况也不完全一致, 计算模型中以实际测量得到的接地电阻值作为各子接地极的接地电阻输入数据根据选择的四个接地极的位置, 可以确定以下基本连接方式。

### 3 广域接地极的自然分流计算

#### (1) 无粤东接地极

东 1、东 2 换流站地理位置接近, 以下以东 1 换流站接入为例进行研究。其中东部换流站以鱼龙岭接地极作为接入点时, 鱼龙岭接地极分流系数较大, 对油气管道影响严重, 故考虑以田源接地极作

为广域接地极接入点。东 1 换流站入地电流取 3 150 A, 若无新接地极时, 对田源—鱼龙岭—天堂互联方案的分析, 有以下方案:

#### 1) 方案 1: 田源—鱼龙岭—天堂广域接地极连接

仅以田源、鱼龙岭、天堂接地极作为广域接地极连接时, 可采用环形连接, 如图 3 所示。逆时针依次田源—鱼龙岭—天堂, 以田源作为广域接地极的接入点, 此种广域连接方案下直流线路总长度约为 609 km。

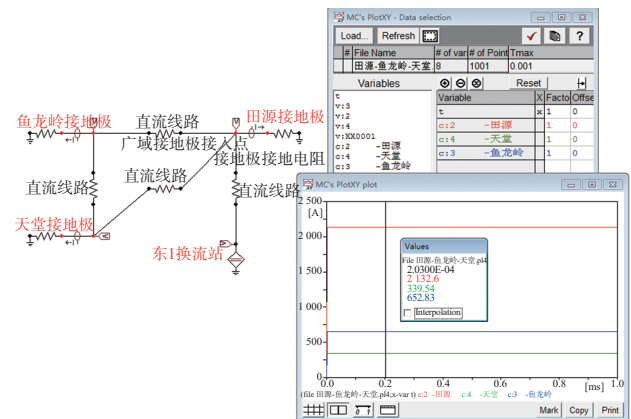


图 3 方案 1 (田源-鱼龙岭-天堂广域接地极) 接入地电流 Fig. 3 DC grounding current of plan 1 (Tianyuan-Yulongling-Tiantang DC WAN grounding electrodes)

在这种连接方式下, 接地极分流系数分别为: 田源接地极 68.2%、鱼龙岭接地极 20.9%, 天堂接地极 10.9%, 分流结果见表 2。

表2 广域接地极自然分流主要参数

Tab. 2 Major parameters for WAN grounding electrode natural shunted current

方案	广域接地极	直流线路			接地极分流系数				
		总长/km	广域连接长度/km	造价/亿元	田源	鱼龙岭	天堂	新村	粤东
1	田源—鱼龙岭—天堂	778	609	7.917	68.2%	20.9%	10.9%	—	—
2	田源—新村	256	87	1.131	73%	—	—	27%	—
3	粤东—田源—鱼龙岭—天堂(顺序连接)	545	434	5.642	10.6%	3.1%	0.3%	—	86%
4	粤东—田源—鱼龙岭—天堂(环形连接)	846	735	9.555	9%	2.9%	2.7%	—	85.4%
5	粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接)	371	260	3.38	10.6%	3.4%	—	—	86%
6	粤东—田源—鱼龙岭(环形连接)	540	429	5.577	10.4%	13.4%	—	—	76.2%
7	田源—粤东—鱼龙岭	429	260	3.38	61.1%	19.5%	—	—	19.4%

注：线路按照130万/km造价估算。

## 2) 方案2：田源—新村广域接地极连接

牛从直流受端接地极位于韶关市翁源县新村，已实施牛从直流受端接地极迁改工程，原从西换流站到新村接地极全长144 km，改接点至新接地极线路长54 km，改接点至旧接地极线路全长33 km。目前新村接地极和部分线路闲置，可考虑利用新村接地极作为广域接地极的终端子站，承担少部分接地电流。

以田源、新村接地极作为广域接地极连接时，采用顺序连接。田源至新村接地极之间的直流线路可利用原从西换流站到新村接地极的线路。该方案工程量较少，同时利用旧接地极线路全长33 km，仅需改造改接点直新接地极线路54 km为同塔双回接地线路，广域连接部分接地极直流线路总长87 km，如图4(a)所示。

分流结果见表2，在这种连接方式下，接地极分流系数分别为：田源接地极73%、新村接地极27%。即新村接地极入地电流是850.5 A，小于目前迁改前允许半小时运行电流1200 A的要求，能否长期运行还需进一步研究，在考虑多回直流的复合电流情况下，将超过1200 A。因此田源—新村广域接地极连接方案可实施性不强。

### (2) 有粤东接地极

若建设粤东接地极，可将接地极址作为广域接地极的接入点，分别有方案3逆时针依次新接地极-田源-鱼龙岭-天堂，如图4(b)所示。方案4田源-鱼龙岭-天堂接地极组成环形连接，如图5(c)所示。这种两种连接方式下，广域连接总长度为分别为434 km和735 km。

方案3天堂接地极的分流系数仅为0.3%，分流

效果极其有限。方案4将田源—鱼龙岭—天堂接地极组成环形连接，增加了直流线路长度，但天堂接地极分流效果依然低于3%，对于东部换流站的广域接地极连接中，天堂接地极距离其他接地极过远，同时具有增容共用方案，接入粤西地区换流站的条件，可舍去天堂接地极作为此广域接地极的子接地极。

方案5位逆时针依次粤东—田源—鱼龙岭作为广域接地极连接，广域连接总长度为260 km，如图4(d)所示。在这种连接方式下，接地极分流系数分别为：新极址为86%、田源接地极为10.6%、鱼龙岭接地极为3.4%。

因鱼龙岭接地极分流系数较小，增加一回直流线路连接新极址和鱼龙岭接地极，组成环形连接，形成方案6，如图4(e)，广域连接总长度为429 km。

组成环形后，鱼龙岭接地极入低电流提高约10%，接地极分流系数分别为：新极址为76.2%、田源接地极为10.4%、鱼龙岭接地极为13.4%。

方案7：改变广域接地极接入点，若将田源作为广域接地极的接入点，依次连接新极址和鱼龙岭接地极，连接方式如图4(e)所示。接地极分流系数分别为：田源接地极为61.1%、新极址为19.5%、鱼龙岭接地极为19.4%。

按照以上几种连接方式，总结广域接地极各接地极的直流线路长度及分流系数如表2所示。

根据表2计算结果可知：

1) 由于广域接地极引线接入点不同，各接地极分流系数发生较大变化，通过改变接地极引线接入点可以调节广域接地极的电流分配情况。

2) 田源接地极已经有4回直流入，不宜作

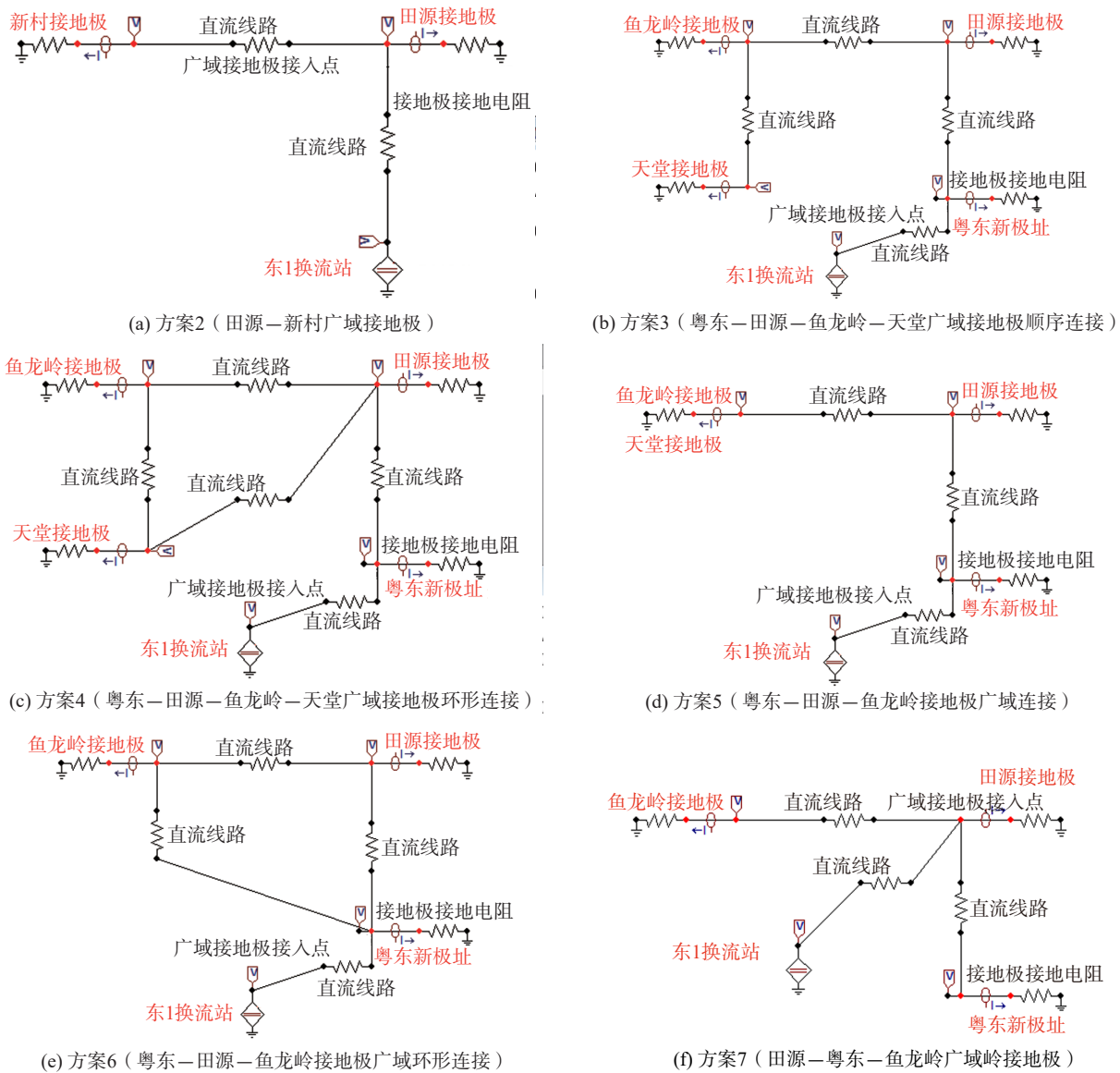


图 4 方案2~7广域接地极连接方案

Fig. 4 DC WAN grounding electrodes plan 2~7

为广域接地极的接地点, 且粤东接地极为新建接地极可作为广域接地极的接入点, 一方面可减小其他子接地极的分流系数, 同时直流线路距离最短, 因此不宜采用方案1和7。

3) 从线路实施难度上看, 顺序连接线路均在珠三角外围, 实施较容易, 环形连接时接地极需穿过珠三角核心区, 实施难度极大, 因此不宜采用方案4和6。

4) 新村接地极和田源接地极广域连接可以利用原有线路, 造价较低, 在新村接地极入地电流是850.5 A, 也在新村接地允许的半小时运行电流

1 200 A内, 方案2田源—新村广域连接可以作为备选方案。

5) 方案3和方案5的差异在于是否接入天堂接地, 从分流效果看, 由于天堂接地处于广域连接的末端, 只分流了0.3%电流, 但线路很长, 效果不明显, 因此推荐采用方案5粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接)广域连接。

#### 4 广域接地极的均流计算

方案5粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接), 其各子接地极的自然分流分布不均匀时, 若对广域接

地极采取均流措施,可在接地极直流线路中串接均流电阻,对各接地极进行均流调整。在广域连接粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接)方式下,在粤东接地极串接一个电阻值为 $1\ \Omega$ 的均流电阻,如图5所示。

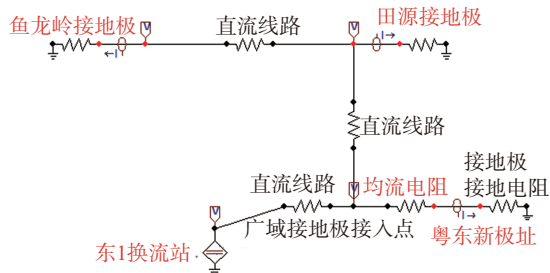


图5 粤东-田源-鱼龙岭(顺序连接)广域顺序连接入地电流(增加均流电阻)

Fig. 5 DC grounding current for Yuedong-Tianyuan-Yulongling (Sequential connection) with current averaging resistor

增加均流电阻后,接地极分流系数分别为:粤东新极址为58.5%、田源接地极为31.5%、鱼龙岭接地极为10%。

为使得各子接地极之间电流分配较为均匀,采取串联一个小电阻来改变广域接地极的电流分配,继而使其接地系统内每一个独立接地极均能满足系统运行要求不失为一可考虑的均流方案。在增加均流电阻后各子接地极分流系数如表3所示。

表3 均流电阻与子接地极之间的分流系数关系

Tab. 3 Relation between current averaging resistors and shunt coefficient

均流电阻/ $\Omega$	粤东接地极分流系数 (加不同均流电阻)	田源接地极 分流系数	鱼龙岭接地 极分流系数
0	86%	10.6%	3.4%
0.5	69.7%	23%	7.3%
1	58.5%	31.5%	10%
1.5	50.5%	37.6%	11.9%
2	44.4%	42.2%	13.4%

从表3可以看出,可采取在子接地极支路增加均流电阻方案来合理分配各子接地极分流系数,调节效果明显,加比较小的电阻,如 $0.5\ \Omega$ ,粤东接地极的即由自然分流的86%降低到69.7%,这样可以降低粤东接地极的建设规模和难度。同样,鱼龙岭接地极对周边影响相对较严重,可以在鱼龙岭接地极接地极串接一个电阻值,减少鱼龙岭侧的入地

电流。

串联电阻流过大大电流时的发热严重,制造难度很大,国内额定电流最大的串联电阻参数见表4,实物见图6<sup>[14-15]</sup>。

表4 串联电阻参数

Tab. 4 Series resistor parameters

材料名称	电流等级/A	总电阻/ $\Omega$	层数	每层并联个数
特制康铜	500	0.5	10	8

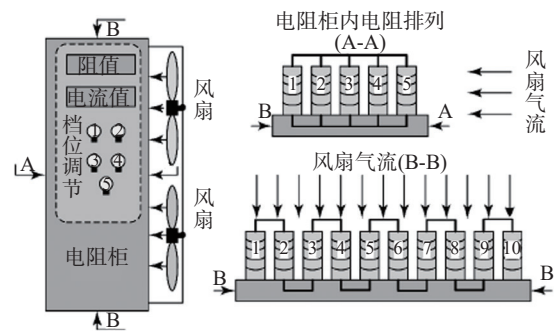


图6 均流电阻器

Fig. 6 Current averaging resistor

南方电网的接地极额定电流普遍大于3 000 A,目前设备需要多组并联,并户内布置改善运行环境,也将给运行带来很大困难。因此现阶段广域接地极建议采用自然分流。

## 5 广域接地极多回直流同时运行工况计算

三回直流同时同极性单极大地回路运行工况可适当加以考虑,而两回直流同时同极性单极大地回路运行工况则必须考虑,作为最严重工况:广域接地极中共三回直流同时同极性单极大地回路运行,基于方案5粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接)广域连接。

考虑鱼龙岭接入两回直流,田源或粤东接地极接入一回直流,共三回直流同时同极性单极大地回路运行时,包含两种运行工况:鱼龙岭2回+粤东1回和鱼龙岭2回+田源1回。其中鱼龙岭2回+粤东1回三回直流同时同极性单极大地回路运行分流见图7。

当东1和东2换流站两回直流同时同极性单极大地回路运行,即粤东接地极接入两回直流,此时广域接地极中田源接地极或鱼龙岭接地极其中一个子接地极也存在一回同极性单极大地回路运行时,广域接地极共三回直流同时同极性单极大地回路运

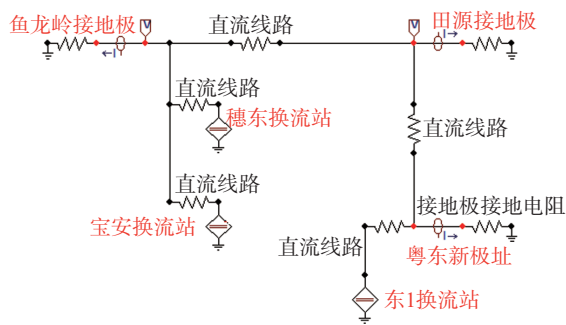


图7 鱼龙岭2回+粤东1回入地电流

Fig. 7 DC Grounding current of Yulongling 2 loop + Yuedong 1 loop

行,包含三种运行工况:粤东2回+田源1回、粤东2回+鱼龙岭(穗东换流站)1回、粤东2回+鱼龙岭(宝安换流站)1回。

以上多回直流同时运行工况共五种运行工况的广域接地极的各子接地极分流数据如表5所示。

表5 广域接地极共三回直流同时同极性单极大地回路运行分流结果

Tab. 5 Current shunt result of DC WAN grounding electrodes with simultaneous 3-loop DC (same polarity)

运行工况	粤东接地极 (6 250 A)/ 额定电流百分	田源接 地极/A	鱼龙岭接地极 (6 125 A)/ 额定电流百分
鱼龙岭2回+粤东1回	2 844.7(45%)	828.1	5 577.1(91%)
鱼龙岭2回+田源1回	769(12.3%)	2 405.2	6 075.6(99%)
粤东2回+田源1回	5 983.8(95.7%)	2 576.7	814.47(13.2%)
粤东2回+鱼龙岭(穗东换流站)1回	5 453.7(87.3%)	918.9	3 002.4(49%)
粤东2回+鱼龙岭(宝安换流站)1回	5 450.5(87.2%)	908.8	2 890.7(47%)

在以上两种三回直流同时同极性单极大地回路运行工况下,鱼龙岭接入两回+田源或粤东接入一回、粤东接入两回+田源或鱼龙岭接入一回共三回直流同时同极性单极大地回路运行时,广域连接粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接),三个子接地极均未超过其额定电流值,同时能减少了粤东、鱼龙岭接地极两回直流共用异极性时的电流,降低粤东极址的设计要求,同时缓解鱼龙岭接地极对油气管道和周边电力系统的影响,具有实施的可行性。

## 6 结论

1) 广域接地极可将一回直流单极大地回路运

行电流由多个子接地极分担,较常规接地极减小了单个极址的电磁效应。

2) 广域接地极辅以合适的均流措施可满足多回直流共用的需要,可通过加小电阻或改变接地极引线接入点来调整电流分配,但均流电阻制造难度大,运行较复杂,尚难进入实用阶段,广域连接方案中首先考虑自然分流。

3) 新增粤东极址,东1换流站接入广域连接中,广域连接粤东—田源—鱼龙岭(顺序连接),能减少粤东、鱼龙岭接地极两回直流共用异极性时的电流,降低粤东极址的设计要求,缓解鱼龙岭接地极对油气管道和周边电力系统的影响,有利于西电东送直流接地极的建设和运行。但在不增加均流电阻的情况下,效益仍不明显。

4) 在三回直流同时同极性单极大地回路运行工况下,广域接地极均未超过其额定电流值,同时能减少了子接地极两回直流共用异极性时的电流,降低新极址的设计要求。

## 参考文献:

- [1] 王建武,张劲松,李岩,等.广域接地极方案初步研究[J].高压电器,2010,46(12):25-28.  
WANG J W, ZHANG J S, LI Y, et al. Primary research on HVDC WAN grounding electrode [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 25-28.
- [2] 胡劲松,郑宇光,于洋.特高压直流输电接地极设计技术综述与展望[J].全球能源互联网,2018,1(增刊1):290-295.  
HU J S, ZHENG Y G, YU Y. Overview and prospect of ground electrode designing technology in HVDC projects [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(Supp. 1): 290-295.
- [3] 孙帮新,陈辉祥.高压直流输电共用接地极技术研究[J].高电压技术,2006(12):150-153+167.  
SUN B X, CHEN H X. Common grounding technique used in the HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2006(12): 150-153+167.
- [4] 谭威,孔志达,简翔浩.垂直型直流接地极设计探讨[J].南方能源建设,2016,3(4):60-63.  
TAN W, KONG Z D, JIAN X H. Discussion on DC vertical ground electrode design [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 60-63.
- [5] 湛阳.椭圆环布置的垂直型直流接地极的溢流特性[J].中国电力,2021,54(4):185-191.  
SHEN Y. The current releasing characteristics of DC vertical earthing electrode forming an elliptical ring [J]. Electric Power, 2021, 54(4): 185-191.
- [6] 湛阳,周艳青.深井型和垂直型直流接地极的导流方式[J].



- 电气技术, 2019, 20(10): 60-63.
- SHEN Y, ZHOU Y Q. The current guiding method for deep-well and vertical DC earthing electrode [J]. *Electrical Engineering*, 2019, 20(10): 60-63.
- [7] 周友斌, 全江涛, 文习山, 等. 直流输电分布式接地极建模与应用 [J]. *电网技术*, 2015, 39(2): 387-392.
- ZHOU Y B, QUAN J T, WEN X S, et al. Modeling of distributed grounding electrodes for HVDC power transmission system and its application [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(2): 387-392.
- [8] 黄义隆, 张波, 国建宝, 等. 改善直流电流地中分布的接地极互联技术研究 [J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1338-1344.
- HUANG Y L, ZHANG B, GUO J B, et al. Research on improving DC current distribution in earth by interconnecting DC grounding electrodes [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1338-1444.
- [9] 周挺, 胡金. 降低接地极直流偏磁影响的接地极选址优化研究 [J]. *智能电网*, 2017, 5(4): 351-355.
- ZHOU T, HU J. Optimization research on HVDC electrode site selection for reducing the DC magnetic bias effect upon the power system [J]. *Smart Grid*, 2017, 5(4): 351-355.
- [10] 何衍和, 肖磊石. 高压直流输电系统接地极对油气管道影响分析 [J]. *贵州电力技术*, 2016, 19(8): 42-46.
- HE Y H, XIAO L S. Summary analysis of the impact of HVDC grounding electrode on oil and gas pipelines [J]. *Guizhou Electric Power Technology*, 2016, 19(8): 42-46.
- [11] 蔡汉生, 胡上茂, 刘刚, 等. 牛从直流翁源接地极入地电流对周边变压器直流偏磁的影响 [J]. *南方电网技术*, 2015, 9(7): 11-15+21.
- CAI H S, HU S M, LIU G, et al. Influence of Wengyuan DC grounding electrode current of Niuzhai-Conghua HVDC project on DC bias of adjacent power transformers [J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(7): 11-15+21.
- [12] 饶宏, 李岩, 黎小林, 等. 4个直流输电工程共用1个接地极运行方式的研究 [J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1179-1185.
- RAO H, LI Y, LI X L, et al. Study on four HVDC systems sharing a common ground electrode [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1179-1185.
- [13] 孔志达. 独立接地极改造为共用接地极方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 112-117.
- KONG Z D. Research on the plan of independent earth electrode reconstructed to common earth electrode [J]. *Southern Energy Construction*, 2015, 2(3): 112-117.
- [14] 张晓, 尹晗, 何金良, 等. 以降低跨步电压为目标的直流多环接地极电流配比的优化 [J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1217-1224.
- ZHANG X, YIN H, HE J L, et al. Decreasing step voltage by optimizing current distribution proportion of multi-ring DC ground electrode [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1217-1224.
- [15] 葛瑞祯, 郭剑, 王秋生, 等. 紧凑型接地极用均流电阻器的研制及应用 [J]. *电子测量技术*, 2014, 37(12): 19-24.
- GE R W, GUO J, WANG Q S, et al. Development and application of average-current resistor used in the compact grounding electrode [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(12): 19-24.
- [16] 谭波, 董晓辉, 刘鸣亚, 等. 考虑土壤电阻率分布各向异性的高压直流接地极均流电阻配置方法及试验验证 [J]. *高压电器*, 2021, 57(5): 144-150.
- TAN B, DONG X H, LIU M Y, et al. Configuration method and test verification for equalizing resistance of HVDC earth electrode considering anisotropy of soil resistivity distribution [J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(5): 144-150.

#### 作者简介:



高嘉

1982-, 男, 云南昆明人, 高级工程师, 学士, 从事电网规划管理工作 (e-mail) 736262021@qq.com。

高嘉

#### 郑智慧

1993-, 女, 河南信阳人, 工程师, 硕士, 从事变电站、换流站设计研究工作 (e-mail) zhengzhahui@gedi.com.cn。

#### 熊纽

1989-, 男, 湖北孝感人, 工程师, 硕士, 从事电力设计咨询工作 (e-mail) 45370523@qq.com。

#### 简翔浩 (通信作者)

1975-, 男, 广东云浮人, 高级工程师, 学士, 从事变电站、换流站设计研究工作 (e-mail) jianxianghao@gedi.com.cn。

#### 陈硕

1995-, 男, 广东博罗人, 硕士, 从事变电站、换流站设计研究工作 (e-mail) chenshuo@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)