

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2019.03.004

非等分布置的特高压直流输电接地极导流系统设计

李文津¹, 赵爱军², 吴小东¹

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;
2. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052)

摘要:为满足特高压直流输电(UHVDC)工程传输容量不断提升的需求,针对接地极导流系统等分布置常规方案的技术缺陷,提出适用于额定直流电流6 250 A及更高的UHVDC接地极导流系统“外六内三”的非等分布置方案。基于电力系统行业标准规定的2种N-1故障及行标未规定但实际运行中可能出线的3种N-2故障,给出接地极导流系统通流能力阈值计算方法,并据此给出“外六内三”非等分方案下接地极导流系统稳态通流及故障态校验。搭建适用于实际工程的仿真模型,详细研究其导流电缆截面选型依据,并根据文中提出方案与常规方案的经济性对比分析,给出非等分布置时高压直流输电接地极导流系统通用设计。

关键词:接地极;“外六内三”;非等分布置;导流电缆截面;经济性对比

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)03-0021-06

0 引言

接地极是高压直流输电工程实现单极大地方运行的重要保证,也是高压直流输电系统不可或缺的重要组成部分^[1]。近年来我国直流输电工程电压等级不断提升,输送容量不断增大,目前已经投运的特高压直流输电(ultra high voltage direct current, UHVDC)工程最高直流电压和最大输送容量分别达 $\pm 1\ 100\text{ kV}$ 及12 GW(准东—华东 $\pm 1\ 100\text{ kV}$ UHVDC工程),额定直流电流最大达6 250 A(锡盟—泰州 $\pm 800\text{ kV}$ UHVDC工程)。

接地极设计的主要控制条件之一即大地电位升(ground potential rise, GPR),故关于GPR的计算一直是接地极研究的重点。文献[2]主要讨论了基于不同电阻率的土壤分层对GPR的影响;文献[3—4]基于镜像法原理建立了多层土壤模型;文献[5—6]基于有限元法对比分析了典型大地土壤模型及多层大地土壤模型下的GPR计算结果差异,并给出了大区域内地电位分布规律。除电场外热场计算同样是接地极研究的重要内容,文献[7]采用三维有限元法辅以合适的边界条件计算了适用于 $\pm 800\text{ kV}$ 电压等级的水平单圆环型接地极的温升;文献[8]采用有限体积法计算了双圆环接地极温度场并将其与Matlab计算结果对比分析;文献[9—10]在计及土壤参数随温度变化的前提下给出了水平型及垂直型接地极温度场理论计算及试验验证。接

地极入地电流对极址周边已有设施的影响方面,文献[11]基于等效入地电流概念,详细计算了直流电流对金属埋管及扁钢接地网的腐蚀深度;文献[12]比较了不同行业对金属腐蚀的判定依据,并给出装设于海岸接地极附近的采油井距离海岸线的最小距离;文献[13]计算了极址附近金属管道自然电位的偏移及沿管道本体的电流流动,并给出防护措施;文献[14]同时考虑海洋及现有交流线路,详细分析了沿海地区接地极对周边交流系统电力变压器中性点直流电流偏磁的影响。

上述研究多集中在对接地极电场热场的计算分析,较少涉及接地极的本体设计。针对额定直流电流提升至6 250 A的现状,文中重点研究UHVDC接地极本体设计核心内容之一的导流系统的优化布置:首先分析等分设计的UHVDC接地极导流系统布置,讨论并给出通流能力阈值计算方法;基于不同故障态工况讨论,提出非等分布置的导流系统接地极布置方案;基于非等分方案下导流系统稳态通流及故障态校验,给出导流系统电缆截面选型,进而得到其通用设计方案;搭建适用于江苏省某 $\pm 800\text{ kV}/6\ 250\text{ A}$ 的UHVDC接地极仿真模型,以验证提出的导流系统非等分方案的正确性及可行性。

1 常规UHVDC接地极导流系统布置

相对已投运且具备较多研究设计及运行经验的 $\pm 500\text{ kV}$ 高压直流输电工程而言,UHVDC接地极设计需注意如下两方面:(1)连续运行时间不超过30 d、最大温升不超过 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、地面允许跨步电势差不超过 $7.42+0.031\ 8\rho_s$ (ρ_s 为地表土壤电阻率)等主

收稿日期:2019-03-14;修回日期:2019-04-19

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(STYHT/15-JS-191)

要性能指标方面^[15-16],与前期同类型工程接地极设计无异。(2)考虑到入地电流最高已提升至6 250 A,特高压直流接地极在导流系统布置、导流电缆选型等方面不宜沿用已有设计思路。

UHVDC 接地极导流系统用于连接接地极中心场区域和电极极环,将直流入地电流从接地极线路引至电极极环并溢出至大地,可分为径向导流系统和极环导流系统两部分,典型布置如图1所示。

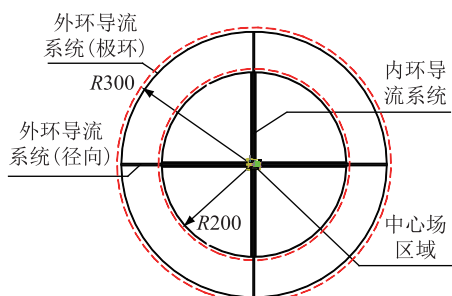


图1 常规接地极设计导流系统布置

Fig.1 Current guiding system design of traditional UHVDC electrode

其布置型式一般为直埋交联聚乙烯绝缘电缆,径向及极环导流系统均采用双电缆并联,电缆沟埋深为1.5 m。极环导流系统与极环馈电棒的连接方式为:每8根馈电棒通过放热焊与极环导流电缆可靠连接,如图2所示。单极大地方式运行时,直流入地电流经径向导流电缆及放热焊引至电极极环,并通过高硅铬铁馈电棒及焦炭炭床,溢出至大地。

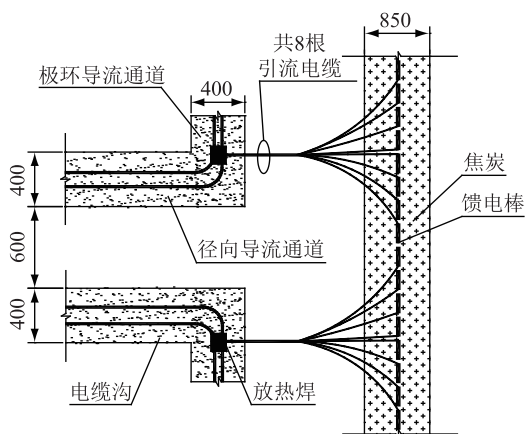


图2 常规接地极设计馈电棒与导流系统连接

Fig.2 Connection of the feeding material and current guiding system of traditional UHVDC electrode design

常规 UHVDC 工程接地极导流系统设计一般采用等分布置,即电极内环、外环导流系统均等分为4段,如图1所示。从电极内、外环溢流特性而言,电极外环溢流明显多于电极内环;当工程容量不断提升电极外环溢流已接近其导流电缆通流能力上限,故存在潜在安全隐患,显然等分设计是造成该隐患

的直接原因。另从故障工况角度分析,同样可以得出导流系统等分设计不利于 UHVDC 工程容量提升的结论,这是因为当导流系统内、外环分段数相同时,内环导流系统通流能力未充分应用,而通流更多的外环导流系统则在故障态校验时更易达到通流能力上限,不利于整个接地极系统的安全运行。

2 常规 UHVDC 接地极导流电缆通流能力

2.1 稳态通流能力

UHVDC 接地极导流电缆通流能力,在稳态运行,即单极大地运行方式下,应满足:

(1) 流经所有内环导流电缆及外环导流电缆的直流电流之和,等于直流入地电流,即 UHVDC 系统的额定直流电流。

(2) 流经内/外环导流系统的直流电流均不超过导流电缆通流能力限值。综合考虑电缆运行温度系数、土壤热阻系数、直埋敷设系数等因素,导流电缆通流能力限值可由下式决定^[17]:

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{\theta_m - \theta_2}{\theta_m - \theta_1}} k_\lambda k_b I_N \quad (1)$$

式中: I_{\max} 为导流电缆通流能力上限; θ_m 为接地极导流电缆允许最高工作温度(即引言中所述最大温升); θ_1 为对应额定载流量的电缆运行基准环境温度; θ_2 为接地极稳态运行时电缆实际工作温度; k_λ 为土壤热阻系数决定的电缆载流量校正系数, k_b 为直埋时不同排列方式决定的电缆载流量校正系数; I_N 为导流电缆额定载流量。

2.2 故障态校验

除满足稳态通流能力要求外,接地极导流电缆还应能通过断线故障校验,即故障工况下流经剩余健全导流电缆的直流电流同样不应超过通流能力上限。文献[15]规定,在发生下列2种故障时,整个接地极系统应能保证持续运行:

- (1) 故障 I: 一根径向导流电缆断线并退运。
- (2) 故障 II: 一段极环导流电缆退运。

UHVDC 工程传输容量较大,双极闭锁会对受端电网带来严重冲击,要尽量提高接地极运行安全可靠。故除上述2种 N-1 故障外,还应将下列3种电力系统标准未明确规定、但实际中可能发生的 N-2 故障考虑在接地极导流电缆故障态校验内,即:

- (3) 故障 III: 2 根径向导流电缆断线并退运。
- (4) 故障 IV: 一段极环导流电缆及一根径向导流电缆同时退运。

(5) 故障 V: 一段极环导流电缆及两径向导流电缆同时退运。

3 非等分 UHVDC 接地极导流系统布置

非等分布的 UHVDC 工程接地极导流系统,即采用“外六内三”的优化方案,将溢流更多的外环导流系统等分为 6 段,将溢流较少的内环导流系统等分为 3 段,如图 3 所示。同时再通过合理设置电极内、外环半径,将内、外环电极总的溢流安培数调整为 1:2,则可实现内、外环导流系统的均衡通流。

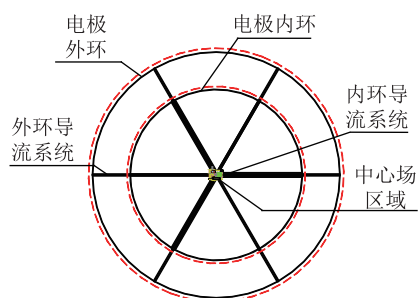


图 3 非等分布接地极设计导流系统布置
Fig.3 Non-equally divided design of current guiding system for UHVDC electrode

相对常规等分布方案而言,非等分布的“外六内三”优化方案,在降低外环导流系统通流压力的同时,提高了内环导流系统利用率,进而提高接地极整体设计经济性,其技术优势为:

(1) 稳态运行时,电极内环、外环通流更加均衡,提高了导流电缆利用率。

(2) 由于稳态时电极内外环通流趋于相等,则不论断线故障发生在电极内环或电极外环,更容易通过故障态通流能力校验。

4 非等分 UHVDC 接地极导流电缆通流能力

4.1 非等分布接地极导流电缆稳态通流

采用“外六内三”的非等分优化布置方案时,UHVDC 接地极导流电缆仍应满足文中第 2 节所提出的选型原则,即在满足流经内外环所有导流电缆的直流电流之和等于额定直流入地电流前提下,确保每段导流电缆稳态通流不超过其上限。具体计算方法与物理量含义同式(1)。

4.2 非等分布接地极导流电缆故障态校验

采用“外六内三”的非等分优化布置方案时,UHVDC 接地的内/外导流电缆通流趋于相等;但由于内外环分段数的不同,显然故障发生在内环是更为严苛的工况。非等分布时 UHVDC 接地极导流电缆故障校验工况如图 4 所示,当发生这 5 种故障时,流经剩余健全导流电缆的直流电流不应超过通流能力上限。

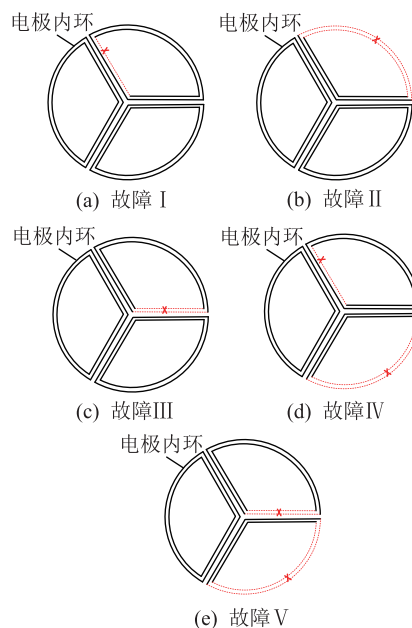


图 4 非等分布接地极导流电缆故障校验
Fig.4 Fault verification of non-equally divided current guiding cable for UHVDC electrode

5 仿真研究

5.1 系统参数

基于高压直流输电大地返回系统设计计算软件(简称 ETTG),搭建适用于江苏省某 ± 800 kV/6 250 A 的 UHVDC 接地极仿真模型,其中外环半径 180 m,内环半径 125 m,内外极环埋深均为 3 m;内、外环馈电材料分别采用 $D75$ mm, $D100$ mm 高硅铬铁馈电棒,焦炭炭床边长分别为 0.65 m, 0.85 m。额定入地直流电流 6 250 A,最长连续运行 30 d,土壤起始温度 20.4 $^{\circ}\text{C}$ (即 θ_1),最高运行温度 90 $^{\circ}\text{C}$ (即 θ_m)。现场实测极环埋深区域土壤热导率为 0.79 $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$,接地极区域土壤电阻率如表 1 所示。

表 1 接地极区域土壤电阻率
Table 1 Soil resistivity of electrode area

| 层序 | 厚度/m | 电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$) | 层序 | 厚度/m | 电阻率/ ($\Omega\cdot\text{m}$) |
|----|-------|-----------------------------------|----|----------|-----------------------------------|
| 1 | 2 | 16.0 | 6 | 3 000 | 36.8 |
| 2 | 10 | 11.0 | 7 | 19 000 | 106.4 |
| 3 | 18 | 7.0 | 8 | 15 000 | 131.4 |
| 4 | 970 | 16.0 | 9 | 40 000 | 118.3 |
| 5 | 2 000 | 18.3 | 10 | ∞ | 69.8 |

5.2 稳态通流能力仿真分析

截取电极内环的 1/3 段分析溢流特性,如图 5 所示,直流入地电流从 T_0 点注入后,溢流过程可分为 2 个步骤:

(1) 步骤一:沿径向导流系统方向分别溢流至 A_1 点和 A_2 点(即 L_1 支路和 L_2 支路),此过程中电流大

小保持不变。

(2) 步骤二:沿极环导流系统方向,从 A_1 点及 A_2 点,逐段通过引流电缆(如图 2 所示)溢出至高硅铬铁馈电棒,并通过焦炭炭床最终溢出至大地。此过程中从 A_1 点及 A_2 点向中点 N ,流经极环导流系统的直流电流不断减小。

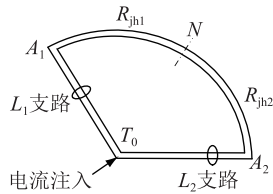


图 5 导流系统溢流特性

Fig.5 Current releasing characteristic of current guiding system

从溢流特性分析可以看出,稳态运行时接地极导流系统最大通流点为径向方向与极环方向的连接处,即 A_1 点和 A_2 点,将其列为电流观测点,经仿真分析,可以得到包括稳态通流在内的 UHVDC 接地极采用非等分“外六内三”布置方案时稳态运行主要参数: A 点同流能力为 174 A,温升为 17.9 °C, θ_2 为 38.3 °C。

5.3 故障态校验仿真分析

故障态校验时导流系统溢流特性不变,故同样应校验内环导流系统的径向方向与极环方向连接处的电流幅值,测点分布如图 6 所示,故障类型已在图 4 中详细给出。

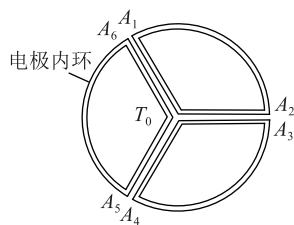


图 6 导流系统通流能力故障态校验时测点分布

Fig.6 Measuring points location of fault verification of current guiding system

经仿真分析可知:采用非等分“外六内三”布置方案的 UHVDC 接地极导流系统通流能力故障态校验如表 2 所示。

5.4 导流电缆通流阈值计算

文献[18]以导流系统内外环等分分段为前提,给出的适用于 ± 800 kV UHVDC 工程的接地极导流电缆型号为 YJY₄₃-6-1×300,其截面积为 300 mm², I_N 为 630 A。采用文中提出的“外六内三”优化方案,特高压直流接地极的导流系统可考虑选择 240 mm² 截面的电缆, I_N 为 555 A。

表 2 “外六内三”方案导流系统通流能力故障态校验

Table 2 Fault verification of current guiding cable of UHVDC electrode using outer-6 and inner-3 current guiding scheme

| 故障类型 | 断线描述 | 健全电缆最大电流/A |
|--------|------------------------------|------------|
| 故障 I | T_0-A_1 | 283 |
| 故障 II | A_1-A_2 | 198 |
| 故障 III | $2 \times (T_0-A_2)$ | 341 |
| 故障 IV | $A_3-A_4+(T_0-A_1)$ | 320 |
| 故障 V | $A_3-A_4+2 \times (T_0-A_2)$ | 385 |

将 $I_N, \theta_1, \theta_m, \theta_2$ 代入式(1),再根据土壤热导率及导流电缆敷设型式^[17],可知 k_λ 和 k_b 分别为 0.86 及 0.91,则可选用 2 种规格导流电缆,即 YJY₄₃-6-1×300 型和 YJY₄₃-6-1×240 型电缆,其用于特高压直流接地极导流系统时通流阈值分别为 483 A,425 A。

5.5 导流电缆截面选型

根据 5.2 计算结果,稳态运行时流经导流系统的直流电流幅值为 174 A,显然 300 mm² 截面和 240 mm² 截面 2 种规格电缆均能满足通流要求,故接地极导流系统电缆选型主要由故障态校验决定。

比选一:采用非等分“外六内三”布置方案时,不同截面导流电缆的故障态校验结果如表 3 所示。可以看出:在 4.2 节定义的 5 种故障下,240 mm² 截面和 300 mm² 截面 2 种规格导流电缆的通流能力均不超过上限,后者安全裕量较大,但从经济性考虑优先推荐 YJY₄₃-6-1×240 型导流电缆。

表 3 不同截面导流电缆安全裕量校验结果对比

Table 3 Comparative diagram of margin verification using different cross-section current guiding cables

| 故障类型 | 健全电缆电流幅值/A | 电流占比 _240/p.u. | 电流占比 _300/p.u. |
|--------|------------|-------------------|-------------------|
| 故障 I | 283 | 0.66 | 0.59 |
| 故障 II | 198 | 0.46 | 0.41 |
| 故障 III | 341 | 0.80 | 0.70 |
| 故障 IV | 320 | 0.75 | 0.66 |
| 故障 V | 385 | 0.90 | 0.80 |

比选二:采用非等分“外六内三”布置且导流电缆截面选择 240 mm² 的新方案(简称文中新方案),与文献[18]推荐的等分常规方案相比,其故障态校验分析如表 4 所示。可以看出:针对文献[15]要求的 2 种 $N-1$ 故障,“外六内三”+240 mm² 截面新方案下安全裕量较常规方案明显提高;针对文献[15]并未要求但实际运行可能出现的 3 种 $N-2$ 故障,文中新方案也能通过故障态校验,而常规方案无法通过。

表4 不同导流电缆选型安全裕量校验结果对比

Table 4 Comparative diagram of margin verification using different current guiding cables

| 故障类型 | 常规方案 | | 文中新方案 | |
|--------|---------|-------------|---------|------------|
| | 电流幅值 /A | 电流占比 /p.u. | 电流幅值 /A | 电流占比 /p.u. |
| 故障 I | 396 | 0.82 | 283 | 0.66 |
| 故障 II | 308 | 0.64 | 198 | 0.46 |
| 故障 III | 501 | 1.04 | 341 | 0.80 |
| 故障 IV | 474 | 0.98 | 320 | 0.75 |
| 故障 V | 600 | 1.24 | 385 | 0.90 |

5.6 经济性比较

文中新方案与文献[18]推荐的常规方案经济性对比如表5所示。可以看出:文中新方案虽然电缆总长度较常规方案多987 m,但其单价更低;即便加上土方量比常规方案多出的 $1\ 542\ \text{m}^3$,文中新方案设备及施工费用合计271.9万元,仍比常规方案的298.5万元节省投资约8.9%,即26.6万元,具备推广应用条件。

表5 不同导流电缆选型经济性对比

Table 5 Comparative diagram of margin verification using different current guiding cable

| 项目 | 文中新方案 | 常规方案 |
|---------------------------|--------|-------|
| 电缆长度/m | 10 136 | 9 149 |
| 电缆单价/(元·m ⁻¹) | 240 | 300 |
| 土方量/m ³ | 9 549 | 8 007 |
| 土方单价/(元·m ⁻¹) | 30 | 30 |
| 合计/万元 | 271.9 | 298.5 |

注:电缆长度裕量按1.05考虑。

6 结语

随着我国UHVDC工程输送容量不断提升,其接地极导流系统常规等分布置方案的缺陷日益明显。对于土壤电阻率及热导率、起始环境温度等参数固定的某个拟选接地极极址而言,当额定直流入地电流提升至6 250 A或更大时,推荐采用文中新方案提出的导流系统非等分布置方案,其通用设计可主要概括如下:

- (1) 导流系统优先采用“外六内三”分段方案。
- (2) 基于“外六内三”方案,通过合理设置电极内、外环半径,将内、外环电极总的溢流安培数调整为1:2,即可实现内、外环导流系统的均衡通流。
- (3) 采用“外六内三”方案后,YJY₄₃-6-1×240型电缆及YJY₄₃-6-1×300型电缆均能满足稳态运行及故障态下的导流系统通流能力校验,优先采用前者以降低工程建设投资。
- (4) 采用“外六内三”方案且导流电缆选择

YJY₄₃-6-1×240规格后,在5种不同故障工况下均能实现故障穿越,安全裕量明显优于导流系统等分布置且采用300 mm²截面导流电缆的常规方案。

参考文献:

- [1] 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司. 高压直流输电设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2017. Central Southeast China Electric Power Design Research Institute. Design manual of high voltage DC transmission system[M]. Beijing: China Electric Power Press,2017.
- [2] 陆继明,肖冬,毛承雄,等. 直流输电接地极对地表电位分布的影响[J]. 高电压技术,2006,32(9):55-58. LU Jiming, XIAO Dong, MAO Chengxiong, et al. Analysis of effects of DC earthed pole on earth surface potential distributions [J]. High Voltage Engineering, 2006,32(9):55-59.
- [3] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京:中国电力出版社,1996:27-25. XIE Guangrun. Power system grounding technology [M]. Beijing: China Electric Power Press,1996:27-25.
- [4] 陈德智,黄振华,刘杰,等. 水平分层土壤中点电流源电流场的计算[J]. 高电压技术,2008,34(7):1379-1382. CHEN Dezhi, HUANG Zhenhua, LIU Jie, et al. Calculation of current field due to a point source in multi-layer soil [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7):1379-1382.
- [5] 郝治国,余洋,张保会,等. 高压直流输电单极大地方式运行时地表电位分布规律[J]. 电力自动化设备,2009,37(6):10-14. HAO Zhiguo, YU Yang, ZHANG Baohui, et al. Earth surface potential distribution of HVDC operation under monopole ground return mode [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 37(6):10-14.
- [6] 刘连光,马成廉. 基于有限元方法的直流输电接地极多层土壤地电位分布计算[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(18):1-5. LIU Lianguang, MA Chenglian. Calculation of multilayer soil earth surface potential distribution of HVDC due to finite element method [J]. Power System Protection and Control, 2015,43(18):1-5.
- [7] 王建武,文习山,杜忠东,等. ±800 kV圆环接地极电流场温度场耦合计算[J]. 电工技术学报,2009,24(3):14-19. WANG Jianwu, WEN Xishan, DU Zhongdong, et al. Coupling calculation of current field and temperature field of ±800 kV cirque dc grounding-electrode [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009,24(3):14-19.
- [8] 张哲任,徐政,徐韬,等. 采用有限体积法的特高压直流输电系统接地极稳态温度场仿真分析[J]. 高电压技术,2012,38(2):328-334. ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Tao, et al. Steady-state temperature field simulation analysis of ultra high voltage dc transmission system grounding electrode using finite volume method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 38(2):328-334.
- [9] 杜华珠,文习山,王羽,等. 水平型直流感地极温升试验与仿真[J]. 高电压技术,2013,39(5):1184-1190.

- DU Huazhub, WEN Xishan, WANG Yu, et al. Test and simulation for horizontal grounding electrode's temperature rise [J]. High Voltage of Engineering, 2013, 39(5): 1184-1190.
- [10] 王羽, 李晓萍, 罗思敏, 等. 垂直型直流接地极暂态温升计算与试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 184-191. WANG Yu, LI Xiaoping, LUO Simin, et al. Test and computation for vertical grounding electrode's transient temperature rise [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 184-191.
- [11] 魏德军. 直流接地极对地下金属设施的电腐蚀影响[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 75-77. WEI Dejun. Electro-corrosion impact of DC grounding electrode on underground metallic facilities [J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 75-77.
- [12] 迟兴和, 张玉军. 直流接地极与大地中金属管道的防护距离[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 71-74. CHI Xinghe, ZHANG Yujun. Protective distance between hvdc electrode and underground metal pipeline [J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 71-74.
- [13] 刘昌, 孟晓波, 樊灵孟, 等. 直工程接地极入地电流对埋地金属管道的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 15-20. LIU Chang, MENG Xiaobo, FAN Lingmeng, et al. Influence of ground return current from hvdc earthing electrode on buried metal pipeline [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 15-20.
- [14] 刘曲, 郑健超, 李立涅. 直流输电系统变压器中性点电流分布的影响因素[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 643-646. LIU Qu, ZHENG Jianchao, LI Licheng. Influential factors on distribution of DC currents flowing through neutrals of transformers [J]. High Voltage Technology, 2008, 34(4): 643-646.
- [15] 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规程: DL/T 5224—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. Technical code for design of HVDC earth return system: DL/T 5224—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [16] 高压直流接地极技术导则: DL/T 5437—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012. Technical guide of HVDC earth electrode system: DL/T 5437—2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [17] 电力工程电缆设计规范: GB 50217—2007 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. Code for design of cables of electric engineering: GB 50217—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [18] ± 800 kV 特高压直流输电工程换流站标准化设计文件之(二): 接地极本体标准化设计指导书[R]. 北京: 国家电网公司, 2015. Standard design documents of ± 800 kV UHVDC converter station (II): standard guideline of earth electrode [R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2015.

作者简介:



李文津

李文津(1984),男,硕士,工程师,从事高压直流输电接地极技术、柔性直流输电及其在新能源电网中的应用工作(E-mail: iwannabeasaga@163.com);

赵爱军(1964),男,硕士,高级工程师,从事高压直流输电技术及其工程化应用工作;

吴小东(1970),男,硕士,高级工程师,从事直流输电换流站工程总体管理及相关设计统筹工作。

Current guiding system design of electrode for UHVDC transmission with non-equally divided scheme

LI Wenjin¹, ZHAO Aijun², WU Xiaodong¹

(1. Central Southeast China Electric Power Design Research Institute, Wuhan 430071, China;

2. China Electric Power Equipment Technology Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: For the demand of transmission of bulk power through UHVDC, based on the faultiness of the equally divided current guiding system of traditional electrode design, this paper proposes a new outer-6 and inner-3 non-equally divided scheme to optimize the current guiding system design of the electrode for the UHVDC transmission system with 6 250 A rated dc current or higher. Based on the two $N-1$ faults which stipulated in grid code and other three $N-2$ faults which occur during real operation, the threshold value of current guiding capability of current guiding system of UHVDC electrode is calculated. Besides, the current loading capacity calculation of guiding system under both normal operation and fault condition with the proposed outer-6 and inner-3 scheme is analyzed. A simulation model is established in the ETTG to discuss the selection of section of current guiding cable. Moreover, an economic comparison between the non-equally divided scheme proposed in this paper and traditional equally divided scheme is conducted. The general conclusion of the electrode current guiding system design with non-equally divided scheme is summarized in the end.

Keywords: electrode; outer-6 and inner-3; non-equally divided; section of current guiding cable; economic comparison

(编辑 刘晓燕)