

DOI: 10.7667/PSPC171452

基于灵敏度分析的直流输电接地极优化选址方法研究

陈庆涛¹, 田宇¹, 丁国成², 吴兴旺², 刘勇³, 吴伟丽⁴

(1. 国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230088; 2. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230088;
3. 安徽正广电电力技术有限公司, 安徽 合肥 230088; 4. 伊犁师范学院电信分院, 新疆 伊宁 833200)

摘要: 为了最大程度避免直流输电工程单极大地运行方式造成的变压器直流偏磁问题, 提出了一种直流输电接地极的优化选址方法。研究了直流接地极选址时需要考虑的大地电性参数、电力规划需求、周边交流电网的结构与参数等因素, 建立了直流接地极位置与变压器直流偏磁风险之间的关联度模型。对此模型进行了灵敏度分析, 并以此为依据, 提出了高压直流输电接地极选址优化方法。以一个交直流混联电网为例研究了优化选址的效果。优化方法对避免交流电网变压器直流偏磁风险有理论参考作用。

关键词: 直流输电; 接地极; 选址; 灵敏度; 优化

Optimization method of grounding pole location for HVDC transmission system based on sensitivity analysis

CHEN Qingtao¹, TIAN Yu¹, DING Guocheng², WU Xingwang², LIU Yong³, WU Weili⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230088, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230088, China; 3. Anhui ZGD Power Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China; 4. College of Telecommunication, Yili Normal University, Yining 833200, China)

Abstract: In order to avoid the DC bias of transformer caused by HVDC project, a method for optimal location of HVDC grounding electrode is proposed. After studying the influence factors of the DC grounding location that should be considered, such as the earth electrical parameters, power planning requirements, structure and parameters of surrounding AC power network and so on, this paper establishes a correlation model between the DC grounding pole position and transformer DC bias risk. Secondly, it makes the sensitivity analysis and on this basis puts forward the HVDC grounding pole location optimization method. Finally, an AC/DC hybrid power grid is used as an example to verify the effect of the proposed method. The optimization method has theoretical reference for avoiding the DC bias risk of AC grid transformer.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Company and Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2017D01C417).

Key words: DC transmission; grounding electrode; site selection; sensitivity; optimization

0 引言

随着我国直流输电工程的建设与投运, 交流系统变压器直流偏磁现象不断增多, 广东电网、新疆电网、宁夏电网和甘肃电网等都曾不同程度地遭受过变压器直流偏磁事件的影响, 治理变压器直流偏磁投入大量成本的同时, 还会面临因电网参数与结

构调整而导致的直流偏磁次风险。研究表明, 直流输电接地极位置不同, 造成周边变电站中性点电流的分布不同, 因此在运行规划初期, 结合大地电性参数、电力规划需求和交流系统的影响等方面因素优化选择直流输电接地极极址, 不失为一个避免直流偏磁风险的有效方法。

目前我国已经在极址勘探方面有成熟的研究成果^[1-2], 对接地极设计的研究也比较深入^[3-5]; 文献[6]和文献[7]对接地极温升进行过计算和试验, 此外, 文献[8]和文献[9]还对直流极对交流电网内变压器的不利影响进行过论证, 文献[10-11]等提出了分

基金项目: 国网安徽省电力公司科技项目资助“大型电力变压器直流偏磁危害研究及仿真建模”; 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2017D01C417)

布式直流接地极的设计思想和实施方案,经实例验证,对周边交流系统直流偏磁电流的抑制有一定的作用,不过,这种分布式接地极在直流输电受端应用居多。此外,面对直流接地极的选址越来越困难的问题^[12],南网科研院还从关键技术参数、钻井施工要求、电气安装工艺等方面开展全方位的技术研究,提出了千米深井的直流输电接地极的方案,并通过了可行性试验研究阶段^[13]。上述研究为缓解交流系统直流偏磁问题的压力提供了有效的解决方法。

不过,对于各种形式的直流输电接地极而言,仍需要解决的问题是选址与优化,为此,论文提出了考虑交流输电系统直流偏磁电流分布与接地极极址之间的灵敏度的极址选址与优化的方法:首先建立了偏磁电流与直流输电接地极间的关系模型,对此模型进行灵敏度分析,在此基础上,构建了以引发周边变电站直流偏磁风险最低为目标函数的选址优化模型,并利用 NSGA-III 求解模型,最后,以标准算例验证了优化方法。

1 直流输电影响下偏磁电流灵敏度分析

1.1 直流输电单极运行方式下偏磁电流模型

考虑直流输电影响下的交流电网偏磁电流的直流特性,变电站中性点直流可采用如下思路计算,首先用下式计算直流接地极电流造成的交流电网变电站节点电压。

$$\mathbf{Y}_n \mathbf{U}_n = \mathbf{J} \quad (1)$$

式中: $N \times N$ 阶矩阵 \mathbf{Y}_n 是考虑接地支路的系统导纳矩阵; $N \times 1$ 阶矩阵 \mathbf{U}_n 代表直流接地极电流造成的交流电网变电站节点电压; $N \times 1$ 阶矩阵 \mathbf{J} 则代表因直流接地极作用在交流电网变电站节点的等效电流源,且其中第 m 个元素为

$$J_m = \sum_{i=1}^N \frac{U_{im}}{R_{im}} \quad (2)$$

式中: R_{im} 是变电站 i 和 m 之间输电线路等效直流电阻,如两变电站间没有输电线路,则 R_{im} 趋于无穷大; U_{im} 表示变电站 i 和 m 间的等效电压,可用式(3)计算。

$$U_{im} = U_i - U_m = \int_{L_i} E_i dl - \int_{L_m} E_m dl \quad (3)$$

式中: L_i 和 L_m 分别为变电站 i 和 m 与接地极间的直线距离; E_i 和 E_m 分别为变电站 i 和 m 与接地极间的地电场强度,考虑到大地电性结构的横向差异, E_i 和 E_m 不一定相同或均匀。

当接地极注入电流为 I_g 时,根据文献[11]可知,

对包含有 n 个变电站接地网和 1 个接地极的地下电流场,还存在下述关系,如式(4)。

$$\mathbf{U}_n = \mathbf{I}_n \mathbf{R}_{nn} + \mathbf{I}_g \mathbf{R}_{ng} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_{nn} 为 n 个变电站接地网阻抗矩阵,对角线元素为自阻,非对角线元素为互阻; \mathbf{R}_{ng} 为接地极与变电站之间的互阻抗向量。当变电站直流电压 U_n 计算出来后,可以利节点电压方程得到变电站偏磁电流 I_n 。

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{G}_n \mathbf{U}_n \quad (5)$$

式中, \mathbf{G}_n 为包含变电站接地电阻的交流电网支路导纳矩阵。

1.2 偏磁电流与接地极电流的灵敏度分析

一般来讲, $I_n \ll I_g$, 忽略 I_n 后式(4)可得

$$\mathbf{U}_n = \mathbf{I}_g \mathbf{R}_{ng} \quad (6)$$

并有

$$\frac{\partial \mathbf{U}_n}{\partial \mathbf{I}_g} = \mathbf{R}_{ng} \quad (7)$$

联立式(5)可得

$$\frac{\partial \mathbf{I}_n}{\partial \mathbf{I}_g} = \mathbf{G}_n \mathbf{R}_{ng} \quad (8)$$

当 \mathbf{R}_{ng} 和 \mathbf{G}_n 为常数向量时, \mathbf{I}_n 与 \mathbf{I}_g 呈线性关系。

1.3 偏磁电流与接地极位置的灵敏度分析

由式(5)和式(3)可知,变电站 i 中性点直流可记为

$$I_{ei} = \sum_{j=1}^m \frac{E_i(L_i - L_j)}{R_{ij}} \quad (9)$$

由式(9)可见,变电站与接地极之间的距离差越大,变电站间输电线路直流越大,变电站间的电压差也就越大;大地电阻率越高,相同接地极下产生的地电场越大,变电站间距离差相同时,也会造成较大的变电站间地电压。

2 直流输电极极址优化模型

2.1 优化优化模型

1) 目标函数

假定系统含有 N 座变电站,建立极址优化目标如下。

$$\min \begin{cases} f_{I_{DC}} = \sum_{i=1}^N I_{ei} \\ L = \sum_{\substack{i=1, j=2 \\ j \neq i}}^N (\|L_g - L_i\|_2 - \|L_g - L_j\|_2) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_{i_{bc}}$ 表示变电站中性点电流之和; $\|L_g - L_i\|_2$ 表示变电站 i 与接地极间的距离。

2) 约束条件

$$G \in Area \quad (11)$$

式(11)中的 $Area$ 表示经过前期地质勘测、土壤评估以后, 认为可以建设高压直流接地极的区域范围。

2.2 基于 NSGA-III 的接地极优化选址算法

优化算法比较多^[14], 之所以选择 NSGA-III 的原因是, NSGA-III 算法是在 NSGA-II 的框架下发展起来的, 保留了 NSGA-II 的优势^[15-16], 二者的本质区别在于选择个体的机制。相比而言, NSGA-III 在多目标优化求解时能够具有更准确的全局搜索能力^[16-17]。利用 NSGA-III 算法求解接地极址优化的方法如下。

1) 数据处理与准备

输入大地电阻率参数、接地极电阻、变电站接地电阻等参数, 输入电网结构与参数信息, 将接地极地址、变电站地址用经纬度表示(lon, lat)。

2) 数据处理

根据输入数据, 选择直流接地极某一初始极址, 将初始值代入式(3)、式(4)和式(9)求取各变电站中性点直流, 构建式(10)中的目标函数, 再对目标函数进行归一化处理。

标量化。设置式(11)范围内的经纬度间隔, 遍历每一个目标维度 i 上的可能值并构建、标量化最小数值集合 z_i^{\min} , 则目标函数 $f_i(\text{lon}, \text{lat})$ 可以转化为

$$f'_i(\text{lon}, \text{lat}) = f_i(\text{lon}, \text{lat}) - z_i^{\min} \quad x \in \text{st}. \quad (12)$$

式中, st 表示可选择的接地极极址个体, 里面包含有经度和纬度的信息, 按照式(11)给定的范围选择。

a. 归一化。先定义下式:

$$\text{ASF}(\text{lon}, \text{lat}, W) = \max_{i=1:M} \frac{f'_i(\text{lon}, \text{lat})}{W_i} \quad (13)$$

$$x \in \text{st}.$$

式中, W 为每个求解空间坐标轴上的权重矢量, 如果坐标轴不存在, 则对应的权重矢量可用极小值代替。遍历每个目标函数, 找到 ASF 数值最小的个体, 进而算出对应坐标轴上的截距 α_i , 最后用下式归一化:

$$f_i^n(\text{lon}, \text{lat}) = \frac{f'_i(\text{lon}, \text{lat})}{\alpha_i - z_i^{\min}} = \frac{f_i(\text{lon}, \text{lat}) - z_i^{\min}}{\alpha_i - z_i^{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

b. 参考点的确定

归一化后, NSGA-III 的参考点可在归一化的超平面内进行: 2 个目标函数可以围成 1 个归一化超平面 H, 则规定沿着每一个目标函数所在轴进行 p 等分的话, 则参考点可以选择 p 个。

c. 关键层解选择策略

将参考点构建为一个集合, 称为关键层。将已经在种群中的每个解(也就是关键层之前层里面的所有解)都关联到一个参考点, 关联之后, 每个参考点 j 都会有一个与它关联的解的数量 ρ_j ; 再从关键层里面选一个解加入到种群, 选择的策略是: 选 ρ_j 最小的参考点 j , 如果 $\rho_j = 0$, 则从关键层里面选择一个到该参考点 j 距离最小的解加入种群, 否则把该参考点从当前代中去除。如果 $\rho_j \geq 1$, 则从关键层里面随机选择一个关联到该参考点的解加入到种群。

经过上述处理后的种群, 接下来的计算就与 NSGA-II 求解优化问题的过程类似^[18-19], 不再赘述。

2.3 优化流程

具体优化过程如下:

第 1 步, 输入初始参数, 处理极址数据, 设置迭代参数, 设置经纬度间隔系数 δ ;

第 2 步, 在式(11)范围内输入初始极址信息, 归一化目标函数构造 NSGA-III 初始种群, 评估种群个体;

第 3 步, 根据式(7)和式(8)的灵敏度分析结果改变 δ , 遍历极址可能的选择, 代入式(10)计算目标函数的解空间, 构建参考点, 评估新种群, 新个体, 存入外部空间;

第 4 步, 检验新个体, 并将子代替换种群后是否收敛, 收敛则判断是否达到预置的迭代数, 如达到则将子代存入可行解集, 程序结束, 如未达到预置的迭代次数, 转入第 2 步; 不收敛则转入第 3 步。

优化流程见图 1。

3 算例分析

3.1 交直流混联模型分析

图 2 所示为某一交流电力系统, 共有变电站 8 个, 每个变电站都是双变压器并联运行, 15 条输电线路(Sub4-Sub5 和 Sub3-Sub6 间是双线路)。两种电压等级线路分别两种颜色表示, 其中 Sub7 中性点不接地。模型详细参数见文献^[20]。表 1 为电网覆盖区域对应的大地电性模型。

表 1 为电网覆盖区域大地电阻率参数。

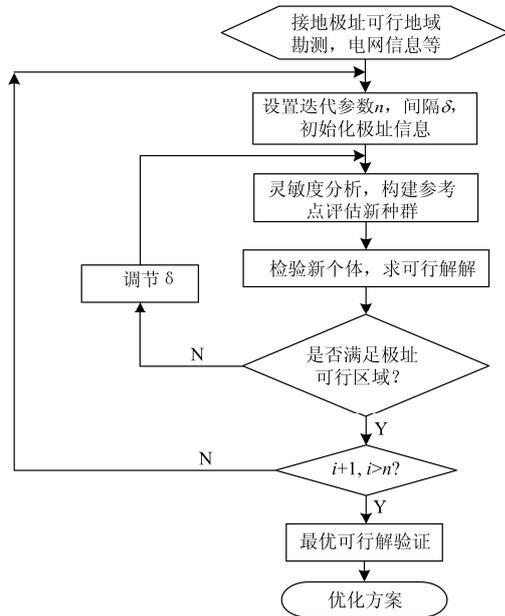


图 1 直流输电接地极优化选址优化流程

Fig. 1 Optimization process of grounding pole selection for HVDC transmission line

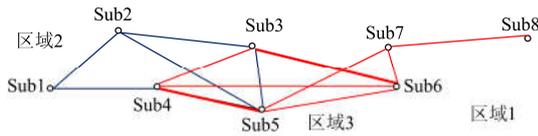


图 2 某双电压等级电力系统模型单线图

Fig. 2 Single-line diagram of dual-voltage power system model

表 1 大地电阻率参数

Table 1 Earth resistivity parameters

厚度/ km	电导率 1/ (S/km)	厚度/ km	电导率 2/ (S/km)	厚度/ km	电导率 3/ (S/km)
0~25	2.5	0~10	0.5	0~20	0.001
25~50	0.002 1	10~25	0.002 5	20~50	0.005
>100	0.002 1	>50	0.000 33	>50	0.02

表 1 中, 电导率 1、电导率 2 和电导率 3 分别代表图 2 中标示 Region1、Region2 和 Region3 处的大地电导率。

假定直流输电接地极可以在(33.5°N, 81°W)、(33.5°N, 81°E)、(31.5°N, 87°W)和(31.5°N, 87°E)范围内选址, 额定注入电流为 $I=5\ 000\ \text{A}$ 。

根据式(10)构建目标函数, 目标函数 1 为 8 个变电站中性点直流总和, 目标函数 2 为与 8 个变电站距离最小的地点; 根据式(11)构建约束条件。

取经纬度间隔系数 $\delta=0.02$, 初始种群数目为 200, 则计算出各变电站接地电流之和与变电站间距差之和求解过程如图 2 所示。

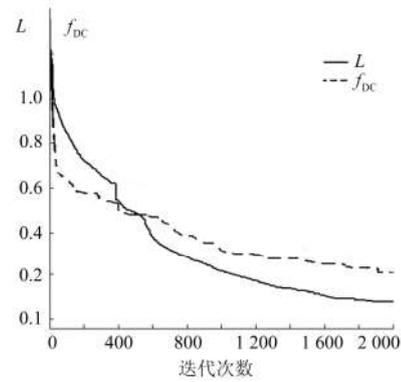


图 3 最优折中解与代次数的变化曲线(归一化)

Fig. 3 Objective function curve with iteration number (normalized)

Pareto 解下的变电站中性点总直流, 结果见表 2。

表 2 Pareto 解集中性点总直流

Table 2 Total DC of neutral point in Pareto solution set

Pareto 解	Latitude/(°)	Longitude/(°)	中性点直流/A
1	33.613	-87.374	311.97
2	34.310	-86.366	299.01
3	33.955	-84.679	312.10
4	33.548	-86.075	309.28
5	32.109	-84.310	296.16
6	33.377	-82.619	309.98
7	34.252	-82.836	302.18
8	34.196	-81.098	307.96

最终得到的接地极极址位于(32.1°N, 84.3°W), 此时变电站中性点直流之和最小, 各变电站中性点偏磁电流分布见表 3。

表 3 优化选址方案后各变电站中性点直流分布

Table 3 DC distribution of neutral point in substation after optimization of location plan

Sub	32.1°N, 84.3°W 中性点直流/A(流向)	Latitude/(°)	Longitude/(°)
1	-23.8	33.613	-87.374
2	-121.26	34.31	-86.366
3	1.15	33.955	-84.679
4	-109.79	33.548	-86.075
5	19.89	32.705	-84.663
6	1.21	33.377	-82.619
7	0	34.252	-82.836
8	19.06	34.196	-81.098

由图 3 可见, 采用 NSGA-III 对极址优化模型进行求解可以在迭代 2 000 次左右收敛, 得到最优可行解。由表 2 可见, 优化选址后, 变电站 3、6 的偏磁电流已经降到阈值以下, 其他变电站偏磁电

流还需要进一步治理。

求解过程中, 虽然可以得到目标函数 2 最小的地理坐标(33.867 7°, -84.6771°), 但根据表 2 可知, 该地点对应的变电站偏磁电流未必最小, 因此最优折中解选择直流接地极地址为(32.1°N, 84.3°W)。

3.2 实际工程案例

某±800 kV 高压直流输电系统的换流站工程建设初期, 根据前期勘测接地极可供选址有两处, 分别为极址 1(北纬 N41.8°, 东经 E97.0° 处)和极址 2(北纬 N40.5° 东经 E96.8°), 直流工程与交流电网接线图参见图 4。

采用本文方法测算合适的接地极位于(N41.4°, E96.4°), (N42.2°, E96.4°), (N40.8°, E97.4°), (N42.1°, E97.4°)区间内, 最终将极址定位于北纬 N41.8°, 东经 E97.0° 处, 参见图 4 中标“□”处接地极。而极址 2(参见图 4 中标“⊠”处接地极)不在计算的最优折中解范围之内。

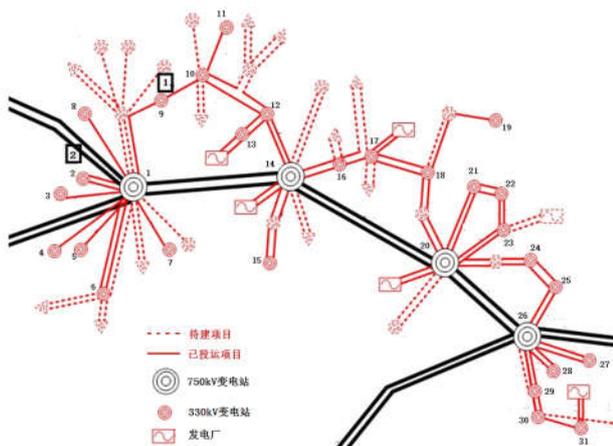


图 4 某±800 kV 直流工程极址选择示意图

Fig. 4 Jiuquan ± 800 kV DC engineering site selection

直流极注入 $I_0 = -5000$ A(其中“-”表示流出)时, 对比两接地极分别作用下的变电站中性点直流结果参见表 4。

表 4 两个接地极作用下变电站中性点直流

Table 4 Neutral point DC of the substation under two grounding poles

接地极 1 处		接地极 2 处	
变电站最大电流/A, 变电站	变电站电流总和/A	变电站最大电流/A, 变电站	变电站电流总和/A
5.029	42.715	50.208	275.388
330 kV 变电站 6		330 kV 变电站 7	

表 4 可见, 当接地极位于极址 1 时, 330 kV 变电站 6 中性点的直流电流最大, 为 5.029 A, 其他各变电站的中性点直流电流都在 6 A 以下。当接地

极注入位于 2 处时, 330 kV 变电站 7 中性点的直流电流最大为 50.208 A, 中性点直流总和达到了 275.388 A。并且, 750 kV 变电站 1 和 330 kV 变电站 2 中性点直流电流分别达到 40.565 A 和 45.073 A, 均有可能造成变压器烧坏。

可见, 采用本文算法选取的接地极 1 对周边交流电网的影响较小。

4 结语

论文针对影响交流系统变压器中性点偏磁电流的因素进行了敏感性分析, 建立了优化选址的方法与模型, 并采用 NSGA-III 进行求解, 模型算例结果表明, 采用本文算法能够在直流输电工程规划阶段有效降低周边交流系统的偏磁电流水平; 对实际工程进行选址核算, 进一步说明了算法的正确性和有效性。研究结果可为直流输电接地极选址提供参考。

参考文献

- [1] 国家能源局. 高压接地直流极技术导则: DLT437—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
National Energy Bureau. High voltage grounding DC pole technical guideline: DLT437—2012[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定: DLT-5224—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
National Development and Reform Commission of PRC. Technical specification for design of HVDC ground return operation system: DLT-5224—2005[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [3] ZHAO Zhibin, CUI Xiang, ZHANG Bo, et al. Analysis of grounding systems in multi-layer soil with finite volumes of different resistivities[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 218-223.
- [4] GUO Jian, LU Jiayu, ZHANG Wenliang. Optimized design method of sharing two grounding electrodes by multi HVDC converter stations[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3171-3176.
- [5] 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 multi-layer soil earth surface potential distribution of HVDC due to finite element method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 1-5.
- [6] 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): 184-190.
- WANG Yu, LI Xiaoping, LUO Simin, et al. Test and computation for vertical ground electrode's transient temperature rise[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 184-190.
- [7] 杜华珠, 文习山, 王羽, 等. 水平型直流接地极温升试验与仿真[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1184-1190.
- DU Huazhu, WEN Xishan, WANG Yu, et al. Test and simulation for horizontal ground electrode's temperature rise[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1184-1190.
- [8] 余洋, 韦晨, 朱林. 直流输电接地极电流对不同结构变压器影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 71-76.
- YU Yang, WEI Chen, ZHU Lin. Impact of HVDC ground electrode current on transformers with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 71-76.
- [9] LI Xiaoping, WEN Xishan, MARKHAM P N, et al. Analysis of nonlinear characteristics for a three-phase, five-limb transformer under DC bias[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2504-2510.
- [10] 阮玲, 黄华, 全江涛, 等. 直流输电新型分布式接地极的优化设计[J]. 电气工程学报, 2015, 10(7): 63-70.
- RUAN Ling, HUANG Hua, QUAN Jiangtao, et al. Optimization design of distributed HVDC ground electrode[J]. Electrical Manufacturing, 2015, 10(7): 63-70.
- [11] 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 Youbin, QUAN Jiangtao, WEN Xishan, et al. Modeling of distributed grounding electrodes for HVDC power transmission system and its application[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 387-392.
- [12] 许朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 140-146.
- XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 140-146.
- [13] 阮江军, 徐闻婕, 丁志锋, 等. 基于场路直接耦合模型的交流电网直流偏磁电流分布研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1333-1340.
- RUAN Jiangjun, XU Wenjie, DING Zhifeng, et al. Study on DC bias current distribution of AC power grid based on field circuit direct coupling model[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1333-1340.
- [14] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [15] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
- XU Jian, LIU Nian, YU Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.
- [16] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
- WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multiobjective dynamic optimal dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [17] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 365-373.
- ZHUANG Huaidong, WU Hongbin, LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of microgrid system considering electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 365-373.
- [18] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
- FENG Shigang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151.
- [19] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265-273.
- QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.
- [20] ZHENG K, TRICHTCHENKO L, PIRJOLA R, et al. Effects of geophysical parameters on GIC illustrated by benchmark network modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1183-1191.

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2018-01-15

作者简介:

陈庆涛(1979—), 男, 高级工程师, 现主要从事变压器、带电检测专业技术管理与研究工作。E-mail: hvdcg@163.com

(编辑 葛艳娜)