

基于节点相关强度的电容式隔直设备的优化配置

提出一种基于最少隔直设备安装数量的优化配置方法,该方法提出直流相关强度的概念,对交流系统中的中性点接地节点计算直流相关强度,并对其进行排序,利用仿真计算为辅助手段,对初始配置方案根据直流相关强度的排序进行降维式优化,逐次减少配置设备数量,直至给出最终的隔直设备优化配置结果。对所提出方法进行了仿真验证,结果表明:该方法实现简便,操作可行,具备工程应用价值。

王冬青 曹楠/南京南瑞集团公司 何飞跃/中国水利水电科学研究院
李扬/国家电网公司信息通信分公司

0 引言

高压直流输电系统单极接地运行时,接地极会注入或流出最大值可能达到几千安培的直流电流,在周边区域内感应出直流电动势,不同位置的变压器接地中性点之间存在直流电动势差,从而在交流系统中侵入直流电流。通常在高压直流输电的接地极附近几十甚至上百公里的范围内,变压器中性点都存在直流侵入的可能,部分变压器中性点会出现直流电流超标现象。目前已有多种原理的抑制或隔离直流电流的设备投入运行,其中电容型隔直设备利用了电容器通交流阻直流的特点实现了对直流电流的隔离,应用范围较为广泛^[1]。因此,有必要对隔直设备的配置地点进行优选,从而找出经济合理、技术可靠的配置方案。

目前隔直设备的配置,大多采取分期安装的方式。初期配置利用工程实测或仿真计算得出变压器中性点直流电流,根据直流电流大小判断隔直设备的安装位置和数量,然后边安装边测量,

判断是否需要后续增加或退出隔直设备,最终以变压器中性点直流电流小于规定值,完成隔直设备的总体配置。这种方式周期长,工作量大,费用高。同时,隔直设备接入电网作为交流电网的一部分,将改变交流系统的直流分布,对交流系统存在影响,仅根据现有的工程测量值或简单的固定运行方式的仿真计算,无法得出防止变压器发生直流偏磁的全面解决方案。

本文提出一种基于最少隔直设备安装数量的优化配置方法,该方法提出直流相关强度的概念,对交流系统中的中性点接地节点计算直流相关强度,并对其进行排序,利用仿真计算为辅助手段,对初始配置方案根据直流相关强度的排序进行降维式优化,逐次减少配置设备数量,直至给出最终的隔直设备优化配置结果。

1 直流电流计算

直流电流在交流系统分布的起因是直流接地极入地电流在土壤中感应出直流电动势,在交流电网的各个接地点之间存在直流电动势差,从而在交流电网中出现直流电流。变压器中性点直流电流的幅值是判断是否配置隔直设备的基础。

直流系统单极运行时,入地电流在土壤中溢散、分流,形成在不同土壤介质中的分层分布式电流场。作为工程计算,直流电流的求取可以采用一定的简化算法,分地下及地上两部分^[2],步骤如图1所示。



王冬青/高级工程师

关键词/Keywords

优化配置·

直流偏磁·

电容式·

直流相关强度·

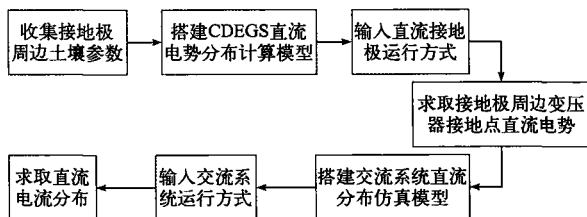


图1 直流电流分布计算步骤

直流电动势计算中，大地采用三层土壤模型，将土壤参数输入CDEGS软件，可以求取接地极入地电流在各变电站接地极的感应电动势。

将各个变电站接地极的直流电动势等效为直流电压源接入地上网络的交流系统，计算出直流电流在交流系统的分布^[3]。图2为简单的交流电网示意图，直流电动势从变电站接地极所在位置接入。

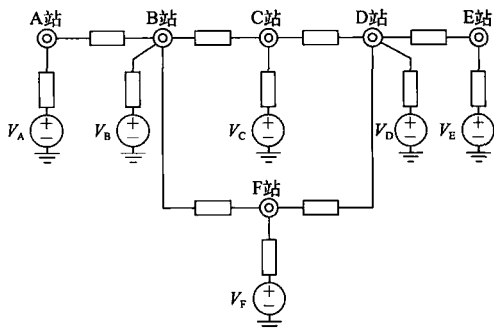


图2 地上网络直流电流分布分析

图2中，站间及对地电阻全部为直流等效电阻，根据交流系统的运行方式，可以根据交流网络的变化获得各支路直流电流的分布，进而得出各接地点直流电流的分布。

2 目标函数

直流电流在交流系统的分布决定了抑制偏磁设备的配置，抑制直流偏磁设备的投退又直接影响交流系统电流分布，二者是相互关联的。配置过程中，在某些关键节点接入隔直设备与在所有直流电流超标点接入隔直设备，都可能达到对直流的抑制效果。因此，隔直设备的配置存在多种解决方案。

配置隔直设备的规则以及优化配置的目标函数如下

$$\begin{cases} I_k < I_{\text{set}} & k=1,2,\dots,n \\ \text{Num} = \min(N) \end{cases} \quad (1)$$

式中， k 为节点号； n 为节点总数； N 为装设的抑制偏磁设备的台数；Num为最少设备安装数量。

约束条件为区域内变压器中性点电流小于限值，《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规范》^[4]中规定：变压器绕组允许通过的直流电流与其额定电流有关，单相取额定电流的0.3%，三相取0.7%，三相五柱取0.5%。所设置的最优目标为抑制偏磁设备台数最少。

3 相关强度的概念

按照可能的直流接地极最大单极入地电流，由地下网络计算推出的变电站接地点等效电动势可视为恒定。隔直设备的接入主要影响地上部分交流系统中的直流分布。因此，需要分析隔直设备接入系统对直流电流分布的影响。由图2所述的地上网络^[5]可知

$$I = YV \quad (2)$$

式中， Y 为节点直流导纳矩阵，对于节点 i 与节点 k 之间的电流，可以从下式求取

$$i_{ik} = Y_{ik}(V_i - V_k) \quad (3)$$

式中， Y_{ik} 为节点直流导纳矩阵中 i 与节点 k 之间的互导纳； V_i 与 V_k 分别为节点 i 与节点 k 接入的等效直流电动势。

所有与节点 i 连接支路的电流之和即为由节点 i 流入交流系统的直流电流。

从式(3)可以看出，若在节点 k 接入隔直设备，等效为该节点直流断路，则该节点不再流入直流，该点的等效直流电压源也与网络断开，不再为系统提供直流电流。

节点 j 的直流电流相关强度定义为节点直流导纳矩阵中第 j 列所有元素之和与节点 j 的等效电动势的乘积，即

$$M_j = V_j \sum_{k=1, k \neq j}^n Y_{kj} \quad (4)$$

由式(4)可以看出， M_j 的大小可以反映接地节点 j 与其他各节点流入直流的相关性。因此，在搜索冗余配置的隔直设备过程中，可以采用相关

强度来评价各节点的直流电压源对区域内其余节点的相关作用强度。相关强度强的节点,配置隔直设备效果明显;相关强度弱的节点,配置隔直设备效果也会弱。

4 优化配置的实现

配置方案的选择可以采取穷举法、典型配置法以及降维式搜索法。穷举法对区域内的各变压器中性点做所有可能的配置方案,对于目前的交流电网来说,直流接地极附近50 km范围内可能的中性点接地变压器数量至少为50台,因此,穷举法的运算量过大,工程上无法实现。

典型配置法借用工程验证的思路,分阶段配置隔直设备。其实现步骤为:

1) 在对区域内交流系统进行直流电流分布计算的基础上,对直流电流超标点配置隔直设备。

2) 将隔直设备仿真模型接入仿真系统中的变压器中性点。

重复步骤1)和2),直至所有变压器中性点电流均低于标准。

典型配置法的配置方案参考了当前利用工程监测实现隔直设备的全面配置的方法,配置方案有限,无法寻求最优解决方法,同时,隔直设备的分期配置互相影响,可能存在重复配置的情况。

对于可能存在的冗余配置设备,本文提出一种采用降维式搜索的方法,在已有配置方案的基础上,搜索可以退出隔直设备的节点,以达到减少设备数量的目的。搜索的过程中,可以对各个节点按相关强度的强弱排序,逐个试探退出设备是否为多余的配置设备。

降维式搜索法的实现步骤为:

1) 利用典型配置法获得初始配置,搭建符合初始配置的仿真系统。

2) 计算各个变压器中性点的相关强度 M_j ,将 M_j 按大小排序,序号1对应 M_j 最小值的节点号,以此类推,序号 n 对应 M_j 最大值的节点号。

3) 在仿真模型中,退出 M_j 排序序号为1的节点隔直设备,计算直流电流分布,判断是否满足要求。

4) 符合要求则返回步骤2),继续进行降维搜索。

5) 不符合要求则投入退出设备,在仿真模型中退出 M_j 排序序号为2的节点隔直设备。

循环上述步骤,如果所有节点均不符合要求,则初始方案即为最后方案。

按上述步骤,最终获得隔直设备数量最少的优化配置方案。

5 算例分析

以某特高压接地极周边的变电站配置隔直设备为例,首先应用CDEGS软件仿真计算获得接地点电动势,在软件中输入接地极参数以及接地极周边的土壤参数,根据接地极接地电流可计算得出大地电位分布规律。其次以直流接地极为中心,搭建基于PSCAD/EMTDC的交流系统仿真模型^[6]。将直流接地极注入电流对交流变压器的影响等效为在变压器中性点接入直流电压源。在PSCAD中建立仿真模型,由于直流系统单极接地运行可能影响的交流系统限定在一定范围内,所以交流系统仅需搭建局部系统模型,外部系统采用等效电路代替^[7]。

5.1 交流系统模型

示例14节点系统的布置如图3所示,图示按地理位置标注接地极、各节点的位置以及节点间的输电线路。

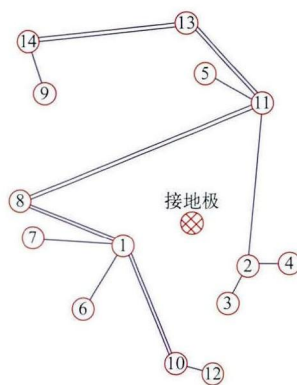


图3 示例14节点系统的地理分布

对示例系统搭建的仿真电路如图4所示。

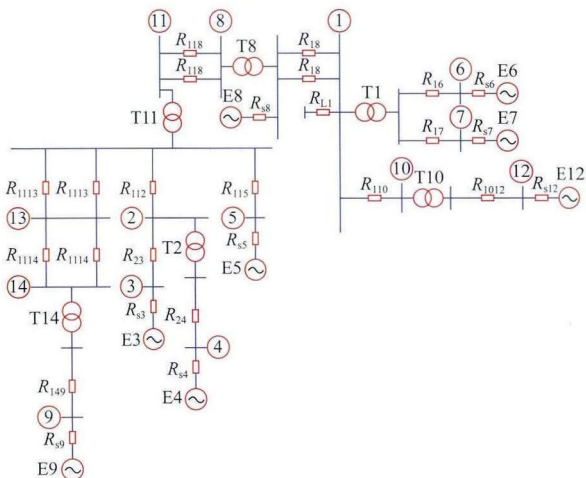


图4 示例14节点系统的仿真电路

仿真模型中, 示例地区的计算变电站接地点直流电位数据及初始直流电流分布如表1所示。表中, 直流电流以流入变压器中性点电流为参考正方向。

表1 初始仿真数据

站点序号	电压等级/kV	距接地极的距离/km	直流电位升高/V	直流分布电流/A
1	220	12.49	61.06	48.5
2	220	13.38	53.03	13.55
3	220	13.38	53.03	21
4	220	20.55	19.44	10.05
5	110	24.47	12.39	9.15
6	220	25.06	11.66	2.09
7	110	26.72	9.89	3.8
8	110	27.70	9.02	5.53
9	500	28	8.78	3.87
10	110	30.26	7.25	0.87
11	220	35.26	5.13	4.33
12	500	35.62	5.01	7.02
13	110	37.15	4.60	0.44
14	220	40.94	3.83	1.49

中性点串联电容法抑制直流的原理很简单, 对于直流来说, 电容几乎断路, 可以完全隔绝电流。仿真分析中, 直接接入电容模型, 并按1 000 μF 设置, 模拟电容式隔直设备^[8]。

按初始直流电流分布计算, 本方案中, 设置直流电流超标限值为5 A, 在直流电流超标点配置隔直设备, 可得初始配置方案及配置后直流电流分布如表2所示。

表2 隔直设备初始配置方案

站点序号	隔直设备配置	直流分布电流/A
1	配置	0
2	配置	0
3	配置	0
4	配置	0
5	配置	0
6	—	4.00
7	—	1.01
8	配置	0
9	配置	0
10	—	1.1
11	—	1.37
12	配置	0
13	—	0.13
14	—	0.20

5.2 优化配置实现

通过以上初始配置方案对其进行优化。根据上述网络, 将等效网络归算到500 kV、100 MV·A, 所建立的相关强度计算如表3所示。

表3 相关强度计算结果

序号	相关强度M/A	升序排列序号
1	43.7	10
2	2 670	14
3	2 652	13
4	3.91	7
5	0.18	3
6	0.48	4
7	2.95	6
8	0.11	2
9	13.8	9
10	363	12
11	0.95	5
12	7.94	8
13	0.1	1
14	192	11

按上述步骤, 对表2所述配置进行优化, 优化结果如表4所示。

对比初始配置方案与优化后的配置方案, 优化后的方案设备数量减少了一半以上, 同时满足变压器接地的中性点直流低于标准值。

表4 隔直设备优化后配置方案

站点序号	隔直设备配置	直流分布电流/A
1	—	1.3
2	配置	0
3	配置	0
4	—	3.13
5	—	0.02
6	—	3.53
7	—	0.86
8	—	1.8
9	配置	0
10	—	1.07
11	—	1.18
12	—	0.13
13	—	0.11
14	—	0.33

6 结束语

本文以仿真方式来计算在隔直设备配置各个阶段的直流电流分布规律，同时提出直流相关强度的概念，应用一种基于最少隔直设备安装数量的优化配置方法，以直流接地极为中心，对一定区域内的配置方案进行优化评估，最终达到一次性配置区域内所有隔直设备的目的。

仿真结果表明：该方法在不降低隔直效果的情况下，能够降低直流偏磁抑制设备配置的数量，方法简单易行，具备工程实用性。

参考文献

[1] 郝桂芹. 变压器直流偏磁抑制方法的应用分析 [J]. 陕西电力, 2013 (6) : 31-34.

[2] DL/T 5224—2005 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定 [S].

[3] 刘鹏, 郭倩雯, 杨铭, 等. 抗直流偏磁的变压器中性点接地方式探讨 [J]. 高电压技术, 2015 (3) .

[4] 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.

[5] 黄佐流. 电力变压器直流偏磁试验研究 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (12) : 69-75.

[6] 王晓希, 阮羚, 文习山, 等. 基于深层大地电阻率的直流偏磁电流特征分析 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (5) : 1536-1543.

[7] 全江涛, 谢志成, 陈科基, 等. 特/超高压直流输电系统单极运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (3) : 787-793.

[8] 徐志, 李胜男, 于辉. 变压器中性点串接电容抑制偏磁措施及其引起的过电压分析 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (14) : 52-56.

(收稿日期: 2016-05-04) **EA**



(上接第32页)

触网上无车辆运行，可切换到融冰模式。

2) 在融冰过程中，电流连续可控。可实现两站之间接触网线路的全线融冰，与单站融冰方式相比，这种方式融冰覆盖面更大。

参考文献

[1] 张安洪. 雪灾对接触网覆冰及其影响的探讨 [J]. 电气化铁道, 2008 (3) : 32-33.

[2] 王国梁. 接触网融冰防冰问题的分析研究 [J]. 铁道工程学报, 2009 (8) : 93-95.

[3] 山霞, 舒乃秋. 关于架空输电线除冰措施的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (4) : 25-27.

[4] 王军, 江平, 杨海英. 城市轨道交通制动能量逆变回馈系统研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2007, 8 (12) : 23-27.

[5] 李群湛. 牵引电力系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.

[6] 左志平, 廖瑞金, 郭超, 等. 玻璃绝缘子超疏水复合涂层的制备及其防冰性能研究 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (4) : 99-105.

(收稿日期: 2016-11-29) **EA**