

变压器直流偏磁影响因素研究

为了有效地制定直流偏磁抑制措施,有必要对直流偏磁电流的影响因素进行全面的分析。基于场路直接耦合法,采用CDEGS软件建立了简化的交流网络模型,计算了不同变电站参数、线路参数和接地极形状下的变压器直流偏磁电流值。研究结果表明,接地电阻小、出线回数多、并联接地变压器台数少及含有较大地理跨度输电线路的站点具有较高的直流偏磁风险,而直流接地极的形状对交流电网的直流电流分布影响不大。研究结果可为直流接地极的选址和直流偏磁的治理提供参考。

吴方劼 申笑林/国网北京经济技术研究院
徐闻婕 吴泳聪/武汉大学电气工程学院

0 引言

高压直流输电在远距离、大容量输电及电网互联方面具有独特的优势,目前我国投运的超/特高压直流输电线路已超过15条,在西电东送、全国电网互联等工程中发挥着重要作用^[1-5]。但随之带来的变压器直流偏磁问题也对电力系统的安全稳定运行造成了很多不利影响^[6-7],例如变压器振动加剧、铁心过热和交流侧继保误动^[8-9]等。直流偏磁影响范围大,涉及站点多,影响因素复杂,为了有效地解决直流偏磁带来的工程实际问题,有必要对变压器直流偏磁电流的影响因素进行全面的分析,探究高直流偏磁风险站点主要特征,以便对高风险站点采取直流偏磁抑制措施。

关于直流偏磁电流的影响因素,国内外开展了较多研究工作。文献[10-12]基于复镜像法研究了深层大地电阻率对直流偏磁电流分布的影响,认为深层土壤中的高阻区域是导致变压器直流偏磁的主要原因。文献[13]运用比较分析法和

节点电压法计算了换流变压器编组和受端电网结构对换流变直流偏磁的影响,结果表明母线馈线长度、回路数及所连变电站距接地极的距离是影响直流偏磁的主要因素。文献[14]研究多条线路单极运行时交流电网的直流偏磁情况,仿真结果表明,多条线路同时单极运行时的直流电流数值等于单条线路单极运行时的代数和。

虽然直流偏磁的研究工作很多,但鲜见较全面地分析直流偏磁影响因素的文献。为此,本文基于场路直接耦合方法,通过CDEGS建立计算模型,计算过程中综合考虑地下土壤分层对接地极附近大地电流场的影响和地上输电线路的电流对地表电位分布的影响,研究了直流偏磁电流的影响因素,研究结果可为直流接地极的参数选择和直流偏磁的治理提供参考。

1 场路耦合模型的建立

直流电流在交流输电系统中流通时,路径中所有元件均呈现电阻特性,地上及地下网络可以看作多导体电阻网络,对该网络进行求解即可获得各导体中的直流偏磁电流分布,计算过程如图1所示。

假定简化后的交流系统包括 n 个变电站、 b 条支路,每条支路的两端均为变电站。规定连接变电站 i 和变电站 j ($i < j$)的支路电压为 $V_n = V_i - V_j$,则 b 条支路电压列向量为

$$V_b = BV_n \quad (1)$$

式中, V_n 为变电站直流电位列向量; B 为



吴方劼/高级工程师

关键词/Keywords

变压器·
直流偏磁·
直流电流·
场路直接耦合模型·

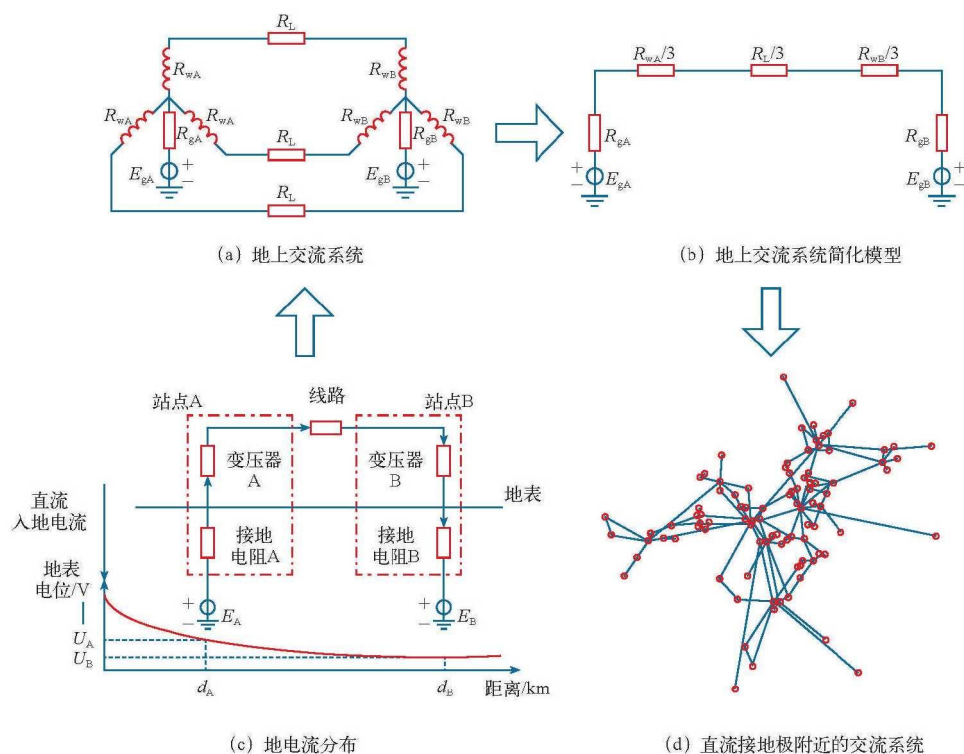


图1 直流偏磁电流求解过程

关联矩阵, 大小为 $b \times n$, 其中第 k 行表示连接变电站 i 和变电站 j ($i < j$) 的第 k 条支路两端信息, $B_{ki} = 1$, $B_{kj} = -1$ 。

规定第 k 条支路电流正方向为从变电站 i 流向变电站 j , 则有支路电流列向量为

$$I_b = G_b V_b \quad (2)$$

式中, G_b 为支路导纳矩阵, 大小为 $b \times b$, 第 k 行第 k 列元素为支路导纳 G_{ij} , 非对角线元素为零。

各变电站入地电流列向量可由式 (3) 求得, 即

$$I_n = -B^T I_b \quad (3)$$

联立式 (1)、式 (2) 和式 (3), 可得

$$I_n = -B^T G_b B V_n \quad (4)$$

对包含有 n 个变电站接地网和 m 个接地极的下电流场, 采用自阻和互阻模型, 可得方程

$$\begin{pmatrix} R_{nn} & R_{nm} \\ R_{mn} & R_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_n \\ I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_n \\ V_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, 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; R_{mm} 为 m 个接地极阻抗矩阵, 矩阵元素意义与 R_{nn} 类似; R_{nm} 、 R_{mn} 为

n 个变电站接地网和 m 个接地极之间的互阻矩阵; I_n 、 V_n 分别为 n 个变电站的入地电流和直流电位列向量; I_m 、 V_m 分别为 m 个接地极的入地电流和直流电位列向量。

将式 (4)、式 (5) 联立, 得到 $2n + m$ 个方程, 考虑到接地极直流电位 V_m 并非关注量, 去掉式 (5) 的后 m 个方程, 可得

$$\begin{pmatrix} R_{nn} & R_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_n \\ I_m \end{pmatrix} = V_n \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6), 整理得

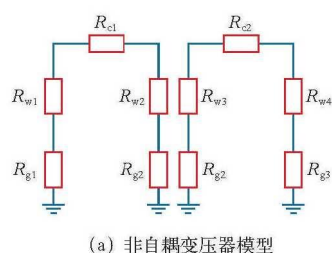
$$(E + R_{nn} B^T G_b B) V_n = R_{nm} I_m \quad (7)$$

式中, E 为单位对角阵。

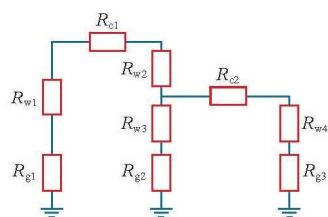
根据式 (7), 已知接地极注入电流为 I_m , 求得变电站电压向量 V_n , 再由式 (4) 即可求得电流向量 I_n 。

2 直流偏磁电流影响因素研究

计算模型共构建3个站点共4个绕组, 如图2所示。图2中, R_{w1} 为站点1的中压绕组, R_{w2} 为站点2的高压绕组 (串联绕组), R_{w3} 为站点2的中压绕组



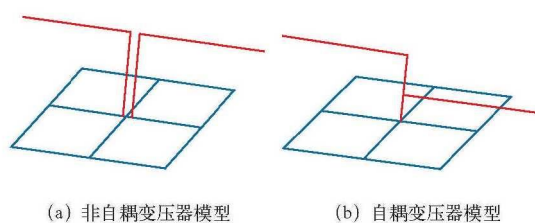
(a) 非自耦变压器模型



(b) 自耦变压器模型

图2 两种基本计算模型

(公共绕组)， R_{w4} 为站点3的高压绕组； R_{g1} 、 R_{g2} 和 R_{g3} 分别为站点1、站点2和站点3的接地电阻； R_{c1} 、 R_{c2} 分别为各侧输电线路电阻。非自耦变压器和自耦变压器的CDEGS计算模型如图3所示。



(a) 非自耦变压器模型

(b) 自耦变压器模型

图3 CDEGS计算模型

计算中采用的土壤模型为水平多层土壤模型，土壤分层情况如表1所示。需要说明的是，由于土壤结构和导电性能随极址不同而异，具体的直流偏磁电流值计算应以实际测量的土壤模型为准。电流的变化规律不随土壤结构变化而改变，因此认为本文计算结果在一定程度能够反映直流偏磁电流的分布规律。

计算中采用的土壤模型为水平多层土壤模型，土壤分层情况如表1所示。需要说明的是，由于土壤结构和导电性能随极址不同而异，具体的直流偏磁电流值计算应以实际测量的土壤模型为准。电流的变化规律不随土壤结构变化而改变，因此认为本文计算结果在一定程度能够反映直流偏磁电流的分布规律。

表1 土壤模型参数

层数	电阻率/ $\Omega \cdot m$	厚度/m
1	100	100
2	300	350
3	500	10 000
4	10 000	30 000
5	100	∞

采用控制变量法，分析了变电站接地电阻、变电站位置、接地变压器台数、输电线路参数和接地极形状等对直流偏磁电流分布规律的影响，由于非自耦变压器与自耦变压器的电流变化规律基本一致，以非自耦变压器为例详细分析各因素的影响。

2.1 变电站接地电阻的影响

在土壤参数、模型结构确定后，采用控制变量法依次改变图2基本模型中的接地电阻值 R_{g1} 、 R_{g2} 和 R_{g3} ，采用CDEGS计算绕组 R_{w1} 、 R_{w2} 、 R_{w3} 和 R_{w4} 中的直流偏磁电流，根据基尔霍夫电流定律，对于非自耦变压器模型，大小关系上总有 $I_{Rw1}=I_{Rw2}$ ， $I_{Rw3}=I_{Rw4}$ ， $I_{Rw3}<I_{Rw2}$ ；由于上述关系，下文图中均只绘制了大小相等的电流中的一个。

改变 R_{g1} 、 R_{g2} 和 R_{g3} 造成的电流改变本质上是一致的，以改变 R_{g2} 为例，各绕组电流的变化如图4所示。由图4可知，接地电阻增大将限制其他站点往该站点对应绕组注入电流，阻止电流由该站点接地网流出大地。在本文算例中具体表现为：

“起始站点”接地电阻增大能够抑制流入交流电网的直流偏磁电流，“终止站点”接地电阻增大能够抑制流出交流电网的直流偏磁电流，“中间站点”则需要通过拓扑连接关系才能进一步确定

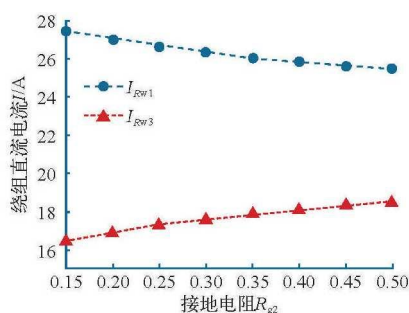


图4 接地电阻 R_{g2} 对绕组电流的影响

其直流偏磁严重程度。

基于以上规律,接地极选址时,距离接地极最近的变电站接地电阻值不宜太小,若“起始站点”和“终止站点”接地电阻较小,则可能导致交流电网整体直流偏磁风险增大。

2.2 变电站位置的影响

直流电流经接地极入地将导致大地电位不等,距离接地极近的站点位于较高电位,距离接地极远的站点位于较低电位,因此,当变压器位置改变,站点间的电位跨度改变将导致交流电网中的直流电流大小、方向发生改变。

图5为接地极与站点间的位置示意图,易知 L_2 不变时, L_1 增大即接地极远离交流系统,各绕组直流电流均会降低,本文重点分析分站点间的距离 L_2 的影响。各绕组的直流电流随 L_2 的变化如图6所示。

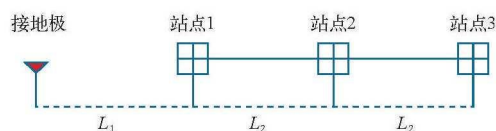


图5 站点位置示意图

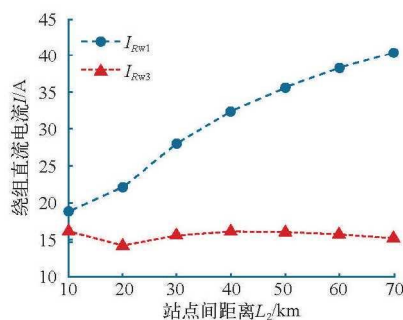


图6 变电站位置对绕组电流的影响

由图6知,站点间距离的增大会导致流经两站点间的直流偏磁电流大幅增加,特别是当其中一个站点与直流感地极距离较近时,大量直流电流被引入整个交流系统,使整体直流偏磁风险大幅增加。因此在进行直流偏磁试验和治理方案制定时,有必要将含较大地理跨度的线路的站点作为试验及治理的重点关注对象。

2.3 并联运行变压器台数的影响

接地变压器台数的增加使各站点等效绕组直

流电阻减小,一方面可能造成流过该站点的直流电流总量增加,另一方面多台接地变压器共同承担直流电流,能够起到降低变电站中各主变压器直流偏磁风险的作用。通过改变模型中变压器绕组的电阻值来模拟多台变压器并联运行,计算各绕组的直流电流值。

由于并联变压器台数的增加可以等效为直流回路中绕组电阻的减小,故改变基本模型中3个站点的并联变压器台数所导致的绕组电流变化基本一致。以站点2为例说明,各绕组直流电流大小变化如图7所示。

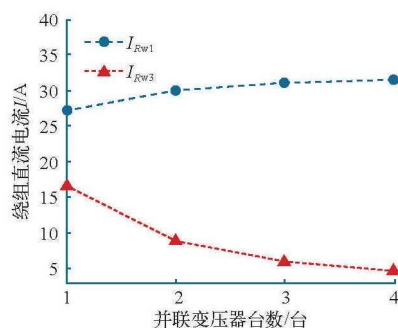


图7 并联变压器台数对绕组电流的影响

由图7可知,当接地变压器台数增加时,由于等效绕组直流电阻减小,造成流过该站点的总直流电流有一定的增加,但增加幅度很小,但是,由于多台接地变压器共同分流,使得流过每台变压器的直流电流数值降低幅度很大。

由上述分析可知,对于实际工程中具有多台变压器并列运行的站点,其直流偏磁风险将会大幅降低,同时考虑到接地变压器台数与治理设备数量一致,治理过程中可将接地变压器台数较多的站点的优先级降低,避免治理设备过多造成成本上升。

2.4 变电站出线数量的影响

为提高资源利用率和保证供电可靠性,站点之间通常会有线路连接关系。在基本模型的基础上,分别增加高压侧和中压侧出线数量,计算不同出线数量下各绕组直流偏磁电流值,各绕组电流的变化与高压侧出线数量的关系如图8所示。

由图8可知,当站点高压侧出线数量的增加

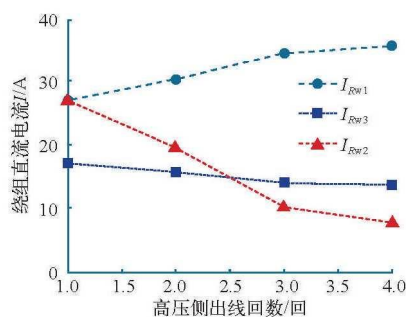


图8 高压侧出线回数对绕组电流的影响

时，该站点自身的直流电流减小，高压绕组电流降低幅度最大，但是，出线回数的增加将导致引入交流系统的直流电流总量增加，增大交流系统的整体直流偏磁风险。因此，出线回数多、距离接地极较近的站点需要重点关注。

2.5 输电线路参数的影响

交流系统中，由于各地区对导电性能、机械强度及输送容量等需求差异，往往采用不同的导线型号、分裂数或线路回数，上述条件的改变本质上改变的是线路电阻 R_{c1} 、 R_{c2} 。

因此，在模型中通过改变输电导线的线路电阻来模拟线路参数的改变，各绕组电流随 R_{c1} 的变化情况如图9所示。

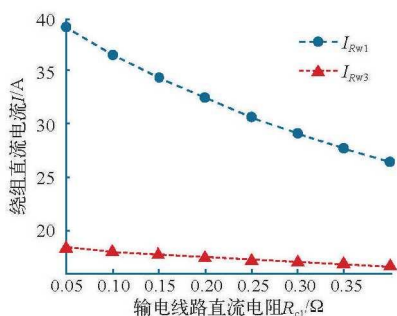


图9 输电线路参数对绕组电流的影响

由图9可知，绕组直流电流随输电线路直流电阻的增大而减小，且下降幅度很大，因此，若站点间线路回数很多，则该站点很有可能出现直流电流超标的情况。

2.6 接地极参数的影响

固定直流接地极的位置，计算垂直形、星形、环形和跑道形接地极四种情况下各绕组直流

偏磁电流值的变化情况，四种接地极形状如图10所示，各绕组直流电流值如表2所示。

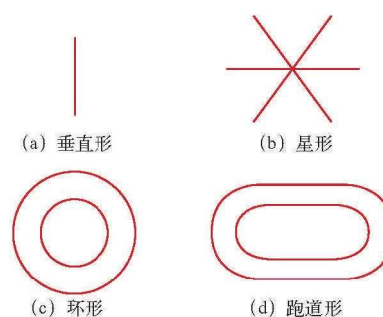


图10 四种接地极形状

表2 四种接地极下的绕组直流电流

接地极形状	绕组直流电流/A			
	R_{w1}	R_{w2}	R_{w3}	R_{w4}
垂直形	26.95	-26.95	16.95	-16.95
星形	27.30	-27.30	17.25	-17.25
环形	26.89	-26.89	16.84	-16.84
跑道形	26.85	-26.85	16.79	-16.79

由表2可知，直流接地极的形状对交流系统的直流电流值影响不大，但接地电阻、最大跨步电压、温升和热时间常数与接地极形状及参数密切相关。由文献[15]可知，垂直形和星形接地极的平均溢流密度偏差系数比环形和跑道形接地极的大，电流分布不均匀程度大。而电流分布不均匀对热时间常数有很大的影响，热时间常数越小，表明接地极温升速度越快，即在相同的电流作用时间下，接地极温度上升越高，对接地极安全运行越不利。双环形和跑道形的热时间常数较大，星形接地极和垂直接地极的热时间常数很小，很容易出现过热。

3 结束语

1) 采用场路直接耦合法，通过建立简化模型，计算了不同影响因素下的变压器直流电流值。

2) 计算结果表明，接地电阻小、出线回数多、并联接地变压器台数少及含有较大地理跨度输电线路的站点具有较高的直流偏磁风险，在进行偏磁试验或治理方案制定时，应对此类站点特

别关注；此外，接地极形状对直流偏磁电流的影响较小，影响较大的是接地极与变电站之间的距离，因此在直流接地极设计时，选址时要充分考虑直流偏磁的影响，而在决定接地极的形状及参数时，应根据其运行性能来决定。研究结果可为直流接地极的选址和直流偏磁的治理等工作提供参考。

参考文献

- [1] 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, 41 (3): 794-799.
- [2] 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.
- [3] 陈青恒, 马洪彬, 何金良. 直流偏磁引起的500 kV 电力变压器振动和噪声的现场测量与分析 [J]. 高压电器, 2009, 45 (3): 93-96.
- [4] 李占元, 赵伟, 丁健, 等. 国华台山发电厂主变直流偏磁电流问题分析与治理 [J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 33-38.
- [5] 汪发明, 张露, 全江涛. 交流电网直流电流分布仿真软件的开发 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (11): 3054-3059.
- [6] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析 [J]. 电网技术, 2005, 29 (3): 9-14.
- [7] 童莉. 500 kV 自耦变压器直流偏磁的仿真研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [8] 周盛. 变压器直流偏磁问题的场路耦合算法 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [9] 阮羚, 全江涛, 杨小库, 等. 深层大地电阻率对交流电网直流电流分布的影响 [J]. 高电压技术, 2015, 40 (11): 3528-3535.
- [10] 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.
- [11] Gonos I F, Stathopoulos I A. Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 100-106.
- [12] Lagae P J, Vuong M H, Lefebvre M, et al. Multilayer resistivity interpretation and error estimation using electrostatic images [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1954-1960.
- [13] 刘连光, 闫旭东, 马成廉, 等. 换流变压器编组和受端电网结构对其直流偏磁的影响研究 [J]. 电网技术, 2016, 40 (1): 322-327.
- [14] 段炼, 江安烽, 傅正财, 等. 多直流接地系统单极运行对沪西特高压变电站直流偏磁的影响 [J]. 电网技术, 2014, 38 (1): 132-137.
- [15] 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]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(收稿日期: 2017-08-30) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告