

# 基于场路耦合方法的直流偏磁仿真研究

梁晓斌 魏 巍 滕予非 丁理杰

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘要:**介绍了使用场路耦合的思路对电力系统直流偏磁进行仿真计算的方法。采用电磁场模型对大地土壤进行分层建模,使用电路等效方法建立直流近区电网中线路、变压器等设备模型,并采用关键节点自由度耦合的方法实现了场路模型的耦合仿真分析。最后,使用该方法对四川电网实际生产中的一次直流偏磁试验进行了建模仿真,反演了试验结果,证明了该方法的有效性。

**关键词:**场路耦合;直流偏磁;有限元

**Abstract:** A field - circuit coupling method is introduced to calculate DC bias in power system. The electromagnetic field model is adopted to build the hierarchical modeling of earth soil. The models for lines, transformers and other equipment in DC neighboring grid are established with the equivalent circuit method. The degree freedoms of key nodes are coupled in order to implement the field - circuit coupling. Finally, this modeling method is used to calculate DC bias in Sichuan power grid, and the test results are inverted which are approximate with the simulation results. It proves the effectiveness of the proposed field - circuit coupling method.

**Key words:** field - circuit coupling; DC bias; finite element

中图分类号: TM41 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)01 - 0029 - 03

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.006

## 0 引言

特/超高压直流工程在运行中可能出现单极大地回路运行方式,该方式将会引发直流接地极近区的直流偏磁现象<sup>[1]</sup>,偏磁电流对电力系统变压器等设备将产生不利影响<sup>[2-3]</sup>。为了应对直流偏磁对电网带来的危害,有必要对大地-电网组成的系统中直流偏磁分布进行仿真计算,为后期的直流偏磁抑制提供依据<sup>[4-5]</sup>。

目前,对电力系统直流偏磁的仿真研究方法主要有以下两种:一种是通过建立多端接地系统间的传递函数,从而模拟偏磁电流的分布模型<sup>[6]</sup>;另一种思路是通过建立大地和电网间的复杂有限元耦合模型,通过仿真计算得到偏磁电流的分布<sup>[7]</sup>。前者物理概念相对清晰,建立起大地的传递函数后,即可顺利求取需要的偏磁电流分布;但是由于土壤和电网之间的复杂耦合关系,准确求取传递函数是比较困难的。第二种方法能够真实地建立整个系统的模型,理论上可以精确计算出偏磁电流的分布;但是这种方法也存在一些难点,主要是计算模型范围较大,

导致模型的精度难以准确把控以及后期的计算量较大,时间较长。

下面采用大地-电网设备的场路耦合建模方法,根据模型参数的实测结果,构建了四川电网宜宾换流站近区的直流偏磁仿真模型,较为准确地反演了直流偏磁测试过程。

## 1 直流偏磁的计算分析

在直流偏磁仿真模型建立中,主要分为3个部分:大地土壤分层模型建立、直流系统模型建立以及直流近区的交流系统模型建立。

由于大地土壤模型具有区域广的特点,难以用等效电阻等电路模型来替代,较好的办法是采用有限元电磁场实际建模的方法,对大地土壤分层建立电磁场模型。这里采用了较为普遍的4层大地土壤模型,具体参数如表1所示。

为了研究变电站受直流偏磁影响的程度,需要建立交流系统的等效电路模型。对电网中的线路、变压器等设备考虑其等效直流电阻,建立直流近区的交流电网等效模型。并且建立系统的直流等效模

型:考虑接地极入地电流的位置、电流大小等因素。最后,将电网的电路模型和大地的电磁场模型在关键节点处进行自由度耦合,形成直流偏磁场路耦合模型。

表1 分层土壤模型

分层	电阻率/( $\Omega \cdot m^{-1}$ )	层厚/km
第1层	200	0.5
第2层	1 000	4
第3层	6 000	10
第4层	2 000	100

## 2 直流近区直流偏磁试验反演

采用 ANSYS14.0 软件,建立了宜宾换流站近区大地-电网场路耦合模型,模拟该区域直流偏磁对电网的影响。将  $400 \times 400 \text{ km}^2$  的大地场模型和大地上分布的电力线路模型离散化,共得到 334 532 个网格,如图 1 所示。其中,网格密集部分为宜宾和泸州地区变电站和输电线路。

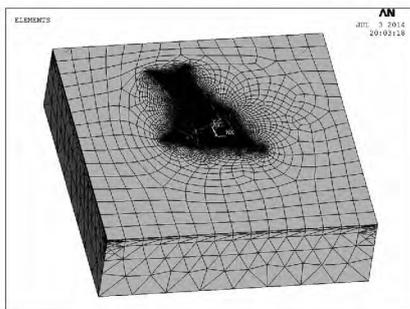


图1 离散化场路耦合模型

以该离散化模型对不同入地电流情况下,近区电网的直流偏磁进行仿真计算。

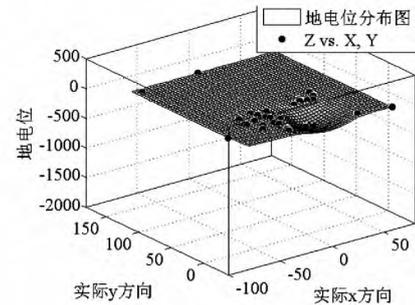
### 2.1 直流近区大地电位

在直流接地极注入  $-1\ 000 \text{ A}$ 、 $-3\ 000 \text{ A}$  和  $5\ 000 \text{ A}$  直流电流下,通过仿真模型,计算得到了接地极近区大地电位。表 2 中为不同入地电流情况下的计算结果。图 2 分别显示了不同入地电流下,大地电位的分布。其中,图 2 内 X、Y 坐标的单位为 km,Z 坐标的单位为 V。

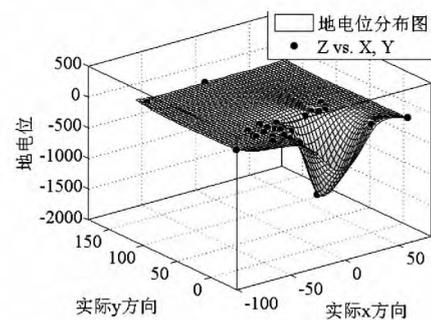
从表 2 结果分析,大地电位的幅值与入地电流大小成线性关系;而大地电位的正负与入地电流的方向有关,例如正向入地电流情况下,地电位均表现为正极性。

表2 不同入地电流时,站点地电位

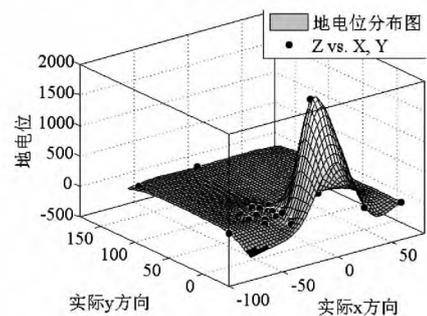
入地电流/A	接地极/V	泸州/V	洪沟/V
-1 000	-377	-13.03	-10.09
-3 000	-1131	-39.09	-30.27
5 000	1 885	65.15	50.43



(a) -1 000 A 入地电流



(b) -3 000 A 入地电流



(c) 5 000 A 入地电流

图2 接地极近区电位分布

从电位分布图中可以看出,电流入地点电位绝对值最大,随着距离接地极的距离增大,地电位绝对值迅速减小,逐渐接近零电位。

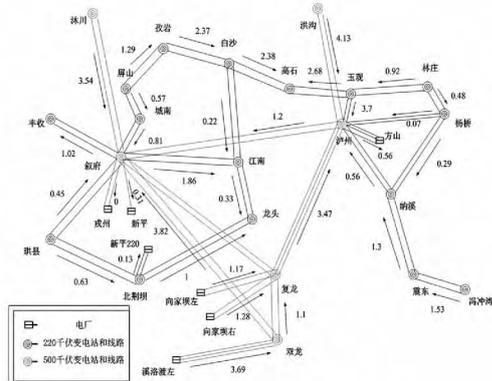
### 2.2 直流近区交流电网直流电流

不同入地电流情况下,入侵交流线路的直流电流大小如表 3 所示。而直流电流在近区交流电网中的分布如图 3 所示。

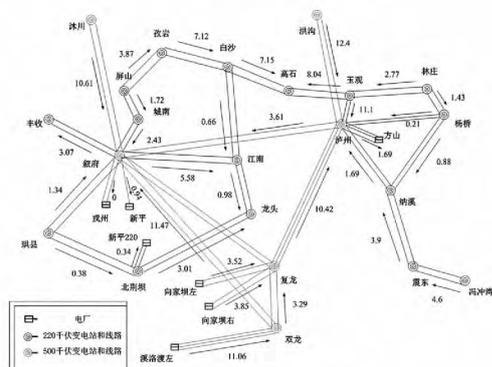
从表 3 中可以看出,交流电网中直流电流大小与入地直流电流大小成线性关系,而方向与入地直流电流的极性有关。

表3 不同入地电流时,交流电网直流电流

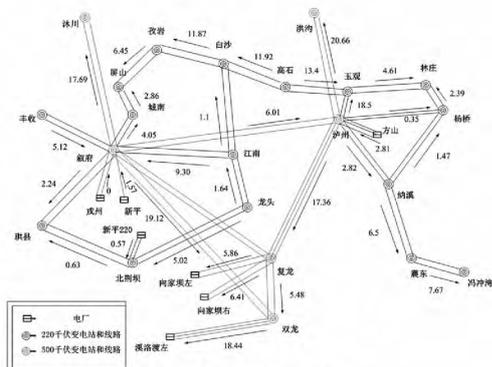
入地电流 /A	泸州—叙府 /A	双龙—复龙 /A	江南—龙头 /A
-1 000	-1.2	-1.1	-0.33
-3 000	-3.61	-3.29	-0.98
5 000	6.01	5.48	1.64



(a) -1 000 A 入地电流



(b) -3 000 A 入地电流



(c) 5 000 A 入地电流

图3 接地极近区 220 kV 及以上交流电网中直流电流分布(单位:A)

### 2.3 直流近区变压器中性点接地电流

表4中,分别计算了不同入地电流情况下,接地极近区变压器中性点电流大小。与上述得到的结论相同,变压器中性点电流大小与接地极入地电流大小成线性关系,方向与入地电流方向相关。

表4 不同偏磁电流下主变中性点直流电流

站点编号	电压等级/kV	变电站	单台变压器中性点电流		
			入地电流 -1 000 A	入地电流 -3 000 A	入地电流 5 000 A
1		泸州	2.06	5.03	-8.38
2		洪沟	-2.07	-6.2	10.33
3		叙府	0.96	2.87	-4.78
4		双龙	-0.14	-0.41	0.68
5		复龙	-0.02	-0.05	0.09
6	500	沐川	-1.77	-5.3	8.83
7		向家坝	-1.16	-3.49	5.81
8		向家坝	-0.65	-1.94	3.23
9		溪洛渡	-0.61	-1.83	3.05
10		新平	0.31	0.94	-1.57
11		戎州	0	0	0.00
12		玉观	0.31	0.53	-0.95
13		林庄	-1.31	-2.34	4.56
14		杨桥	-0.19	-0.58	0.27
15		方山	0.56	1.69	-2.81
16		纳溪	1.01	3.03	-5.05
17		震东	0.23	0.7	-1.17
18		冯冲湾	-1.53	-4.6	7.67
19		高石	0.3	0.9	-2.1
20	220	白沙	0.17	0.52	-0.87
21		孜岩	-1.3	-3.91	6.51
22		屏山	-1.62	-4.87	8.11
23		城南	-0.24	-0.62	0.92
24		珙县	0.6	1.8	-3
25		丰收	1.57	4.72	-7.86
26		北荆坝	-0.96	-2.88	4.8
27		新平	0.11	0.34	-0.57
28		龙头	1.02	2.56	-5.6
29		江南	-0.52	-1.35	0.19

### 2.4 实测结果对比: 变压器中性点接地电流

变压器中性点接地电流是目前能够准确测量的电气参数。为了验证仿真模型的准确性,将5 000 A入地电流情况下,变压器中性点接地电流的仿真结果与实际测量结果进行对比,如表5所示。

从仿真和实际测试结果的对比可以看出,搭建的模型能够较为准确地反映直流偏磁环境下接地极近区变电站主变压器中性点电流大小。

仿真计算中的误差主要来源于以下几个方面:4层土壤模型虽然能减小土壤分布不均带来的模型误差,但是土壤的电阻率误差仍然存在;接地极和各个变电站的实际地理位置有一定偏差;计算模型节点数较多,计算结果在收敛时存在一定误差。

(下转第75页)

Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference ,  
Wuhan ,China: Wuhan University 2009: 1 – 5.

[6] 张嵩, 尤敏, 张保会, 等. 基于数字滤波方法的单端暂态量保护边界元件的实现 [C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十五届学术年会, 长沙, 中国: 长沙理工大学 2009: 1 – 6.

[7] Zhang S, Zhang B H, You M. Realization of the Transient – based Boundary Protection for HVDC Transmission Lines [C]. International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China: CSEE 2010: 1 – 7.

[8] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究 [J]. 电力系统保护与控制 2010, 38( 15): 18 – 23.

[9] 陈仕龙, 束洪春, 万春红, 等. 一种特高压直流输电线

路单端电压暂态保护原理 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41( 3): 26 – 31.

[10] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ±800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30( 31): 108 – 117.

[11] 刘可真. 特高压直流输电线路暂态保护和故障测距问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2013.

[12] 张杰. 特高压直流输电线路暂态保护研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学 2014.

[13] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 2004.

( 收稿日期: 2016 – 09 – 21)



( 上接第 31 页)

表 5 入地电流为 5 000 A 时, 变压器中性点接地  
电流测量值和仿真值比较

站点	测量结果/A	仿真结果/A
泸州站	-8.30	-8.38
叙府站	-4.10	-4.78
纳溪站	-4.01	-5.05
杨桥站	-0.24	0.27
玉观站	-0.64	-0.95
林庄站	3.00	4.56
高石站	-2.70	-2.10
龙头站	-4.70	-5.60
江南站	-0.03	0.19
城南站	0.60	0.92
双龙站	0.23	0.68
方山站	-3.10	-2.81

### 3 结 论

介绍了基于场路耦合建模思路的直流偏磁仿真计算方法。该仿真方法能够较为准确地计算直流偏磁在电网中的分布。基于该方法建立的模型可以预判直流输电单极检修、单极闭锁、双极不对称运行等多种大地回路运行方式下直流偏磁风险, 为制定抑制措施, 保证电网设备安全和稳定运行起到了积极作用。通过将仿真结果与实际测试结果进行比对, 说明了该模型能够较为准确地模拟直流偏磁现象。

#### 参考文献

[1] 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 – 15.

[2] 张雪松, 黄莉. 基于 PSCAD/EMTDC 的变压器直流偏磁仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40( 19): 78 – 84.

[3] 李晓萍, 文习山, 陈慈萱. 单相变压器直流偏磁励磁电流仿真分析 [J]. 高电压技术, 2005, 11( 9): 93 – 99.

[4] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭, 等. 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置 [J]. 电网技术, 2006, 30( 3): 62 – 65.

[5] 蒋伟, 黄震, 胡灿, 等. 变压器接小电阻抑制直流偏磁的网络优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29( 16): 89 – 94.

[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] 张波, 赵杰, 曾嵘, 等. 直流大地运行时交流系统直流电流分布的预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26( 13): 84 – 88.

作者简介:

梁晓斌(1986), 博士、工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制、多物理场仿真;

魏 巍(1984), 博士、高级工程师, 研究方向为电力系统稳定、高压直流输电;

滕予非(1984), 博士、高级工程师, 研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制;

丁理杰(1981), 博士、高级工程师, 研究方向为电力系统稳定及控制。

( 收稿日期: 2016 – 11 – 04)