

# Global Network Optimized Resistance to Restrict Transformers Direct Current Magnetic Bias

Wenbin Chen

Zhangzhou Power Bureau, Zhangzhou  
Email: 306296234@qq.com

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2013; revised: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Apr. 13<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Wenbin Chen. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** When bipolar current of high voltage direct current transmission system operating asymmetrically or monopolar-ground return operating, huge direct current will pour into the ground through the earthing electrode and thus, transformers nearby will be influenced by direct current magnetic bias and add harm on alternating system. Installing resistance in serial of neutral grounding transformers is an effective method to restrict transformers direct current magnetic bias. The paper presents an optimized configuration method of ground resistance to make all the currents through the transformer neutral point in the grid within its limits on the basis of increment network sensitivity analysis. The proposed method is verified by the data from tian-guang HVDC, and the verification result shows that it is a simple and effective method of restricting all the neutral direct current magnetic bias by optimized resistance. The global network optimized resistance method can provide reference value for practical project.

**Keywords:** HVDC; Direct Current Magnetic Bias; In Serial of Resistance; Optimized Resistance of Method

## 抑制直流偏磁电阻的全网优化计算

陈文滨

漳州电业局, 漳州  
Email: 306296234@qq.com

收稿日期: 2013年3月4日; 修回日期: 2013年4月2日; 录用日期: 2013年4月13日

**摘要:** 当高压直流输电系统双极电流不对称或单极大地回路运行时, 巨大的接地极电流入地会使接地极附近变电站的变压器产生直流偏磁, 对交流系统造成不利影响。中性点串接电阻是抑制直流偏磁的有效方法。本文基于增量网络的灵敏度分析方法, 以变压器中性点电流极限值为约束条件, 提出了全网优化接地电阻的计算方法。以天广直流输电线路北郊附近的变压器仿真表明, 这是一种简单有效的抑制全网变压器直流偏磁电流的方法。全局优化接地电阻的计算方法可以为实际工程提供参考价值。

**关键词:** 高压直流输电; 直流偏磁; 串接电阻; 优化电阻计算方法

### 1. 引言

为实现远距离或超远距离大容量送电, 高压直流(HVDC)输电系统在我国正得到越来越广泛的应用。交直流混合运行的电网使得交直流系统之间的影响更加明显, 这在南方电网尤为突出。HVDC系统以单

极大地回路运行时, 直流电流经接地极入地, 在附近的交流电网形成电位差, 部分直流电流经过中性点流入变压器, 形成直流偏磁。一方面使得变压器噪声增加、发热、振动, 直接危害变压器; 另一方面, 直流偏磁的变压器会向电网注入大量谐波, 有可能引起母

线谐波增大,电压畸变,恶化换流器运行条件,导致换相失败和谐波不稳定等。因此,治理直流偏磁显得十分迫切。

文献[1]研究了在变压器中性点注入反抗偏磁直流,却引入了小残余直流偏磁,使变压器噪声、振动高于无直流偏磁情况,且该法仅局限于电流超标的接地处使用;文献[2]研究投切不同组的电容器来切除直流,串联电容法可以彻底切除直流通路,但可能使其他变电站变压器中性点的直流电流增大,引起其他变压器直流偏磁;文献[3]介绍了在电容器两端并联GTO旁路电路,但未有实际使用实例,且考虑到该电容器容量必须非常大,而且价格昂贵,占地面积也非常大,其经济性和使用性方面都有欠缺。

串联电阻法可以改变直流电流的分布,从而减小中性点电流并达到抑制直流偏磁的目的。文献[4]研究了中性点串接小电阻的参数选择方法和方案,但仅考虑到抑制本变电站的直流偏磁,未考虑到对全网其他变压器的影响。本文面向全网的变压器,提出直流等效电路;基于增量网络法求取灵敏度,以全网变压器中性点直流电流不超标为约束,提出了选择小电阻的全网优化方法。

## 2. 直流偏磁的现象及成因

变压器的励磁电流相对较小,允许的直流偏置电流为励磁电流的1倍左右,故较小的励磁电流就可能导致直流偏磁。图1为直流偏磁现象的示意图,可以看出由于变压器的绕组电流叠加了直流分量,使得变压器的运行点进入了饱和区,后导致电流的波形畸变。

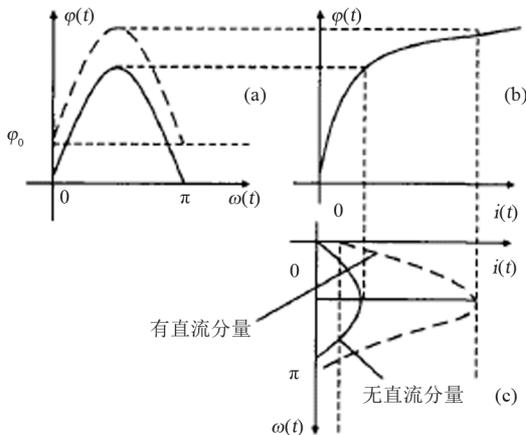


Figure 1. Direct current magnetic bias  
图 1. 直流偏磁

直流偏磁问题在20世纪80年代陆续引起国内外研究学者的重视,并开展了相关的研究<sup>[5-7]</sup>主要是集中在关于太阳风暴引起地磁感应电流产生的变压器直流偏磁。在高土壤电阻率地区,HVDC单极大地回路运行时的大接地极电流会在周围变电站地网上感应出高于地的电位,一旦形成直流通路也有可能导致变压器的直流偏磁。贵广I回直流工程调试期间,在接地极附近变电站主变中性点电流的直流分量大都上升,主变噪声也有不同程度的增加,以春城站最为严重,中性点直流分量达34.5 A,主变噪声达94 dB。天广直流单极大地调试期间,北郊6台主变励磁噪声明显增大,与北郊相连的220 kV输电线路的嘉禾变电站,郭塘变电站,茶山变电站的主变励磁噪声亦增大。HVDC在建设过程中,允许先建成的单极系统以大地回路运行,或某一极因故障或检修推出运行时允许另一极以大地回路运行,都不可避免面临单极运行情况而导致直流偏磁。

## 3. 接地极电流的感应电位求解

HVDC接地极电流引起的偏磁与接地极电流在变电站地网上的感应关,故要先对其求解。假设土壤均匀,接地极为半球形,通过直流电流为 $I_0$ ,无穷远处的电位为0,距离球心处 $x$ 点的电位为:

$$\varphi_A = \frac{I_0 \rho}{2\pi x} \quad (1)$$

式中, $I_0$ 为接地极电流, $\rho$ 为土壤电阻率, $x$ 为地面与球形接地极球心的距离。

对于其他形状的接地极,距离较远时,公式(1)仍然适用,但当土壤为非均匀分布时,尤其土壤电阻率差别较大时,会产生较大的误差。以南方地网为例,当接地极的电流为1000 A时,选用多层土壤的结构模型<sup>[8-10]</sup>(参数如表1)和采用公式(1)的计算结果如图2所

Table 1. The resistivity of multi-layer soil structure  
表 1. 多层土壤结构的电阻率

土壤层	深度/m	电阻率/(Ω·m)
1	50	200
2	1000	1000
3	10,000	5000
4	100,000	100,000
5	∞	100

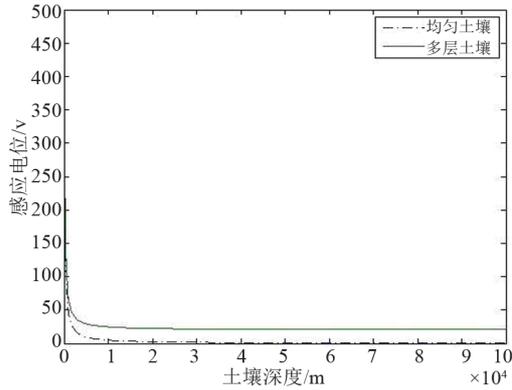


Figure 2. Comparison of induction potential of homogeneous soil and multi-layer soil  
图 2. 均匀土壤和多层土壤的感应电位比较

示, 虚线表示均匀土壤的感应电位, 实线表示多层土壤的感应电位。由图 2 可以看出采用采用公式(1)计算的感应电位随着与接地极的距离增大而衰减得很快, 而采用多土壤结构计算的感应电位则衰减得较慢, 这是因为随着土壤的深入, 电阻率越来越大, 接地极电流就主要沿着土壤表层分布, 从而在地表感应出了比公式(1)的电位高。

#### 4. 变压器的简化模型

对于 110 kV 以上电压等级的系统, 为了保证系统的安全运行, 一般均将中性点直接接地, 从而形成了直流电流的自然通路。求解接地电流首先要简化变压器模型<sup>[5-7]</sup>。

如图 3, 考虑了变压器电阻, 感应电位的两台变压器的等效单相电路。对于含有多台变压器的复杂网络也可以按照此法求解等值电路<sup>[11,12]</sup>。

#### 5. 接地电阻的优化计算

选用适当的方法求解变压器中性点接地直流电流的分布, 变压器的中性点电流是本文要求解的对象, 故可以采用节点电压法:

$$I_s = Y_n U_n \quad (2)$$

其中,  $I_s = [I_1, I_2 \dots I_n]^T$ , 为等效电流列向量;  $U_s = [U_1, U_2 \dots U_n]^T$ , 为节点电位列向量;  $Y_n$ , 为节点电纳矩阵。

中性点接入电阻会改变接地电流的分布, 从而达到抑制直流偏磁的目的, 但接入电阻会使系统的接地性能下降, 故应该再保证电流不超标的前提下, 尽可

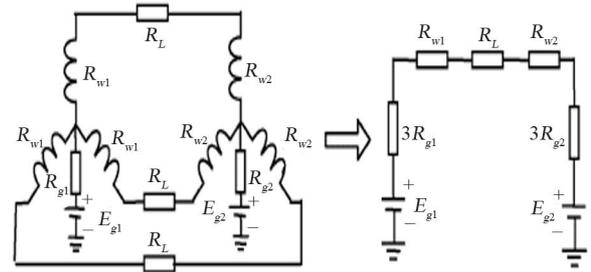


Figure 3. Transformer equivalent single-phase circuit  
图 3. 变压器等效单相电路

能减少接地电阻的数量和阻值, 即在

$$\max(|I_i| - I_{lim}) < 0 \quad (3)$$

条件下, 求  $\min(R_i)$  的解, 其中  $I_i = I_1, I_2 \dots I_n$ , 接地极支路电流;  $I_{lim} = I_{1lim}, I_{2lim} \dots I_{nlim}$ , 接地极支路限制电流;  $R_i = R_1, R_2 \dots R_n$ , 接地极接的接地电阻。

在优化接地电阻的配置中, 需要考虑改变接地电阻的大小对电流分布的影响。借助电网络分析理论, 采用增量网络法求得接地电流对接地电阻的灵敏度<sup>[13]</sup>。设第  $i$  条支路特性用导纳参数表征  $I_i = Y_i U_i$ , 可以得到第  $i$  条支路在增加  $\Delta R_i$  后的电流变化为:

$$\Delta I_i = Y_i \Delta U_i + U_i \Delta Y_i \quad (4)$$

由灵敏度公式可以直接得到对接地电流影响最大的电阻参数。若在求解  $\min(R_i)$  过程中, 出现电流超标的支路, 则可以在灵敏度矩阵中修改灵敏度最大值所对应的接地电阻值, 以符合限制条件。修改接地电阻值, 相当于在电阻上再并联一个电阻, 由于电阻的一端接地, 修改节点导纳矩阵非常容易, 如下:

$$Y'_{ii} = Y_{ii} + \Delta Y_{ii} \quad (5)$$

其中,  $i$  为与需要修改接地电阻相连的节点;  $Z_{ii}$  为修改的接地电阻值;  $Y_{ii}$  为原来的接地电阻值;  $Y'_{ii}$  为修改后的接地电阻。

此过程是在不断的修正影响接地电流分布的最大阻值, 最终得到的是在限制条件(3)下的最小电阻。此解是一个最优值电阻值。

直流电阻的优化过程如下:

化简 HVDC 模型, 建立直流等效模型;

初步计算出接地电流;

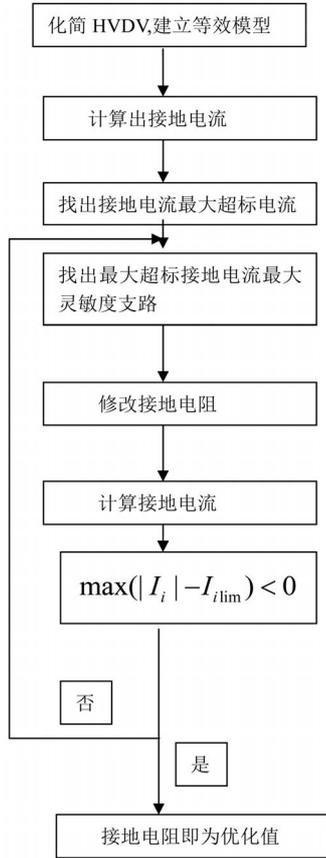
寻找接地电流最大超标的电流;

寻找最大超标接地电流的最大灵敏度支路;

修改接地电阻;

计算接地电流。

直到  $\max(|I_i| - I_{lim}) < 0$ ，计算结束，得到最终的优化电阻。否则重复(3)~(5)，直至条件满足。



## 6. 算例分析

本文以天广直流输电线路位于广东北部的北郊换流站为例，建立直流网络模型，对该系统进行求解直流偏磁电流及接地电阻的优化。天广电压  $\pm 500$  kV，双极容量 180 万 kW，单极运行时入地电流 1800 A<sup>[14,15]</sup>，采用多土壤模型。图 4 为北郊换流站附近变电站地理示意图，忽略离接地极较远的变压器。

表 2 为单极运行时，接地电阻优化配置后对电流

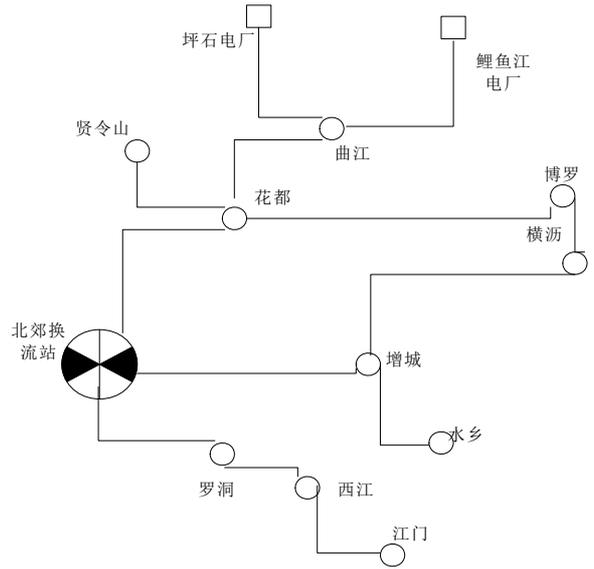


Figure 4. Map of Beijiao transformer substation  
图 4. 北郊附近变电站示意图

Table 2. The influence of grounding current resistance calculation optimization  
表 2. 优化计算后电阻对接地电流的影响

变电站	$I_i$ 限值/A	$I_i$ 初值/A	试验一		试验二		试验三	
			$I_i$ 值/A	$R_i$ 值/ $\Omega$	$I_i$ 值/A	$R_i$ 值/ $\Omega$	$I_i$ 值/A	$R_i$ 值/ $\Omega$
北郊换流站	10.2	-9.2047	-8.035	0	-8.106	0	-3.541	3
花都	8.9	5.7774	6.354	0	6.451	0	4.568	0
增城	8.9	11.1885	1.351	1.2	1.321	1.3	1.321	1
罗洞	8.9	-0.4799	0.2543	0	0.2566	0	0.365	0
西江	8.9	2.5684	3.214	0	3.125	0	3.654	0
水乡	8.9	-0.3715	0.5216	0	0.5247	0	0.654	0
贤令山	8.9	3.2549	4.254	0	4.255	0	1.254	0.6
江门	4.2	-3.654	0.254	0	0.256	0	-1.264	0
横沥	4.2	5.6481	1.324	0.6	1.447	0	1.542	0
博罗	4.2	-4.3581	-2.541	1.2	-0.329	18.6	-3.221	1.6
曲江	4.2	-3.3594	-0.3254	0	-0.3369	0	0.214	0.4
坪石电厂	4.2	2.0654	2.654	0	2.0666	0	2.033	0
鲤鱼江电厂	4.2	-8.6651	1.325	2.2	1.326	2.2	1.254	2.2

分布的影响。 $R_i$ 的修改值以  $0.2 \Omega$  变化,为考虑实际情况,提出了以下方案:一、不考虑接地电阻有任何限制条件;二、考虑了横沥变电站不能接接地电阻;三、考虑增城站的接地电阻不能超过  $1 \Omega$ ,试验结果数据如下:

由表 2 可见,在没有任何加抑制电阻的时,有 4 个变电站的变压器绕组电流超标,试验提出的三种方案均可以达到抑制绕组电流的效果, $R_i$ 接于变压器中性点,简单、有效,经济性好。需要说明的是:实际电网运行的多样性,计算感应电位,可能与实际情况有差别;忽略离接地极较远的变压器会带来误差;直流等值电路也未能符合实际的运行情况;这些原因均会使实际的计算结果和现场的情况有所差别,但作为一种接地极的电阻优化配置计算方法,已经显示了它的有效性,可以为实际工程治理变压器直流偏磁提供参考的辅助手段。

## 7. 结论

1) 采用中性点串接小电阻方法限制流经变压器中性点的直流电流就有简单、实用、可靠、经济性好的特点,是抑制直流偏磁的一种有效措施。

2) 本文提出的基于全网络的等效直流电路,以变压器中性点的电流不超标为限制,采用增量网络的灵敏度分析方法,找到最合理的电阻配置,所得结果为最优电阻,对实际现场抑制直流偏磁有指导意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 蒯狄正, 万达, 邹云. 变压器中性点注入反向往偏磁直流的应用分析[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 44-46.
- [2] 陈青恒. 变压器发生直流偏磁的谐波分析和治理[J]. 广东电力, 2006, 19(11): 34-37.
- [3] 皇甫成, 阮江军, 张宇. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 117-120.
- [4] 赵杰, 黎小林, 吕金壮等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 88-91.
- [5] S. Lu, Y. Lu. Fem analysis of DC saturation to assess transformer susceptibility to geomagnetically induced currents. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1367-1376.
- [6] M. Vakilia, R. C. Degeneff. A method for modeling nonlinear core characteristics of transformers during transients. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 13(4): 1303-1308.
- [7] D. H. Boteler, R. J. Pirijola. Modeling geomagnetically induced currents produced by realistic and uniformers during transients. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1303-1308.
- [8] 潘文霞, 邹鹰. 双层土壤参数的优化计算[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 358-360.
- [9] 张波, 崔翔, 赵志斌等. 大型变电站接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 59-63.
- [10] 张波, 崔翔, 赵志斌等. 计及导体互感的复杂接地网的频域分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 77-80.
- [11] 毛小明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 6-9.
- [12] 林俊昌, 莫文雄. 天广直流输电系统对广东电网的影响[J]. 广东电力, 2003, 16(1): 10-13.
- [13] 吴宁. 电网络分析与综合[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] 赵晔君. 高压直流输电工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [15] L. Bolduc, M. Granger, J. Saintonge, et al. Development of a DC current blocking device for transformer neutrals. IEEE Transactions on PD, 2005, 20(1): 163-168.