

# 变压器直流偏磁抑制措施的研究进展

蒋伟<sup>1,2</sup>, 吴广宁<sup>2</sup>, 刘愈倬<sup>3</sup>, 侯春青<sup>3</sup>

(1 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;  
3 山西电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:** 高压直流输电单极大地回路运行产生的地电流会导致变压器直流偏磁, 引起变压器局部过热、振动加剧、噪声增大等不良反应。分析了抑制流入变压器中性点的直流流量的 3 种主要措施的研究情况, 即串接电容、接动态补偿装置、串接电阻。串接电阻法简单实用、经济性好, 便于在直流接地极附近交流系统推广应用, 指出要以整个交流电网中变压器中性点直流量不超标为目标, 进行变压器接小电阻的合理配置。此外, 变压器内部结构的优化设计和多条直流输电线路共用接地极也能有效地抑制直流偏磁, 对相关研究中的进展和存在的问题进行了论述。

**关键词:** 直流偏磁; 动态补偿; 中性点; 抑制措施

**Abstract:** HVDC transmission system who works in monopolar operation will generate neutral current that causes transformer DC bias which will cause transformer local overheating and increase the vibration noise and other adverse reactions. The study situation of three main suppression methods of neutral current flowing to the transformer is analyzed that is series capacitance connecting dynamic compensation device and series resistance. The series resistance method is simple practical economical and easy to promote the application in AC system near DC grounding electrode. It is pointed out that the aim is no limit exceeding of the DC value of the whole transformer neutral in AC grids and the rational configuration by connecting the resistor is also proposed. In addition, the optimization design of transformer internal structure and a number of DC transmission lines sharing the same grounding electrode can suppress DC bias. The progress and the existing problems of relevant study are discussed.

**Key words:** DC bias; dynamic compensation; neutral point; suppression measure

中图分类号: TM81 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)03-0009-05

## 0 引言

特高压直流输电具有超远距离、超大容量输电的优点, 多条特高压直流输电线路的规划建设有利于缓解中国“能源和负荷分布不均衡”的问题, 推动“西电东送、南北互供和全国联网”的电力战略发展的实施<sup>[1-4]</sup>。中国直流输电的运行经验表明, 变压器局部过热、振动加剧、噪声增大等问题, 是由直流输电单极大地回路运行产生的地电流窜入变压器引起的, 而特高压直流输电的入地电流达 4 kA 左右, 会引发更严重的变压器直流偏磁问题<sup>[5-7]</sup>。

目前, 已有一些关于解决直流偏磁问题的研究, 取得了一些进展, 但也存在不少问题<sup>[8-10]</sup>。多数学者通过研究限制流入变压器中性点的直流电流来缓解直流偏磁问题, 利用电容器来限制直流的方法有 2

种: 在交流线路上串联电容器和在变压器中性点接电容器。串接电容后需要变压器接地的有效性, 以及对系统继电保护及自动化装置、输电线路故障定位装置等的影响分析。中性点直流量的反向补偿法只研究了简单的直流发生装置进行补偿, 尚无学者研究具有报警、启动和闭锁等功能的实时、动态补偿装置。有分析变压器中性点串接小电阻限制地中直流的可行性, 并从抑制效果和继电保护角度分析及该校接入小电阻后对系统造成的影响<sup>[11-15]</sup>。此外, 变压器内部结构的优化设计和多条直流输电线路共用接地极也能有效地抑制直流偏磁, 相关研究取得了一定的进展, 但要在实际直流输电工程中应用, 仍需进行大量的研究和评估<sup>[16-22]</sup>。

下面分析了直流偏磁抑制措施的研究进展, 指出了各种抑制方法的优缺点, 对研究中的问题和不足进行了论述, 明确了直流偏磁抑制措施进一步的研究方向, 以能解决实际问题为目标, 提出了抑制直流偏磁

基金项目: 西南交通大学博士创新基金资助项目

相关研究的建议。

## 1 接电容器抑制法

电容器有“隔直通交”的特性,串联电容器可以达到抑制直流电流的目的,按串联电容器的位置,可分为在输电线路接电容器和在变压器中性点接电容器两种方式<sup>[23-25]</sup>。

### 1.1 输电线路接电容器

输电线路串接电容器在理论上是能有效隔断经变压器中性点串入的直流量,但是,在线路上串入电阻后会增加线路的阻抗,要在较高电压等级的输电线路串接电容器时,电容器的容量必然会很大,这会带来造价、安装、对继电保护的影响等问题。更重要是电容器串接到输电线路后,会降低输电的可靠性,因电容器损坏而带来的损失将是巨大的。另外,系统中的自耦变压器在各电压等级间有电的联系,直流电流可以通过自耦变压器流到另一电压等级的线路。要想有效地隔断串入的直流量,必须在与交流系统相连的所有出线上均装设串联电容器,这必然增加大量资金的投入。因此,该方法在实际应用中并不可行。

### 1.2 变压器中性线接电容器

相对于在输电线路串接电容器法,在变压器中性点接电容器抑制直流偏磁电流的方法更可行。

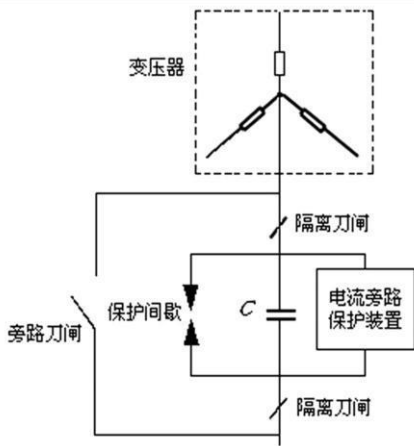


图 1 变压器中性点接电容器及其保护装置

变压器中性点装设电容器时需要在中性点电容器上并联电流旁路保护装置(见图 1),在系统单相短路时,如果电容器两端电压超过一定限值,电流旁路保护装置动作,降低电容器两端的暂态过电压,并且为零序电流提供通路,这样才能尽量减小电容的容量,节约成

本,同时还能减小电容器的体积,便于安装。

但是,该方法也存在以下不足之处。间隙动作受气候、温度、风力、环境污秽物等多项因素的影响,存在着较大的分散性,如果间隙在故障时不能及时击穿,过高的过电压会危及电容器的安全<sup>[26]</sup>。另外,中国 500 kV 变压器以及部分 330 kV、220 kV 和 110 kV 变压器中性点经小电抗接地<sup>[27, 28]</sup>,如果为抑制直流偏磁电流而在中性点接入电容器,需要对电抗器的阻值重新计算,并分析变压器中性点接入电容器和小电抗两个元件后变压器中性点的绝缘水平、对继电保护的影响和是否有效接地等问题。

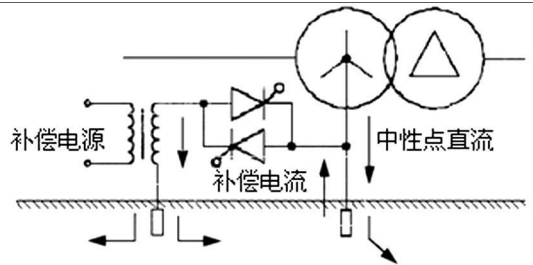


图 2 中性点补偿电流法

## 2 接动态电流补偿装置

中性点补偿电流法是在出现直流偏磁现象的变压器中性点接一个直流发生装置(见图 2),产生一个与直流接地极电流大小相等,方向相反的直流来进行补偿,以此来削弱甚至是消除中性点直流量,从而避免变压器发生直流偏磁<sup>[28, 29]</sup>。

由于接地极直流量的大小并不一定恒定,故该方法关键是要研制高灵敏度的霍尔电流传感器监测中性点直流,再将中性点电流相关信息传输给补偿电流装置,以便进行实时动态补偿,动态补偿装置原理见图 3。

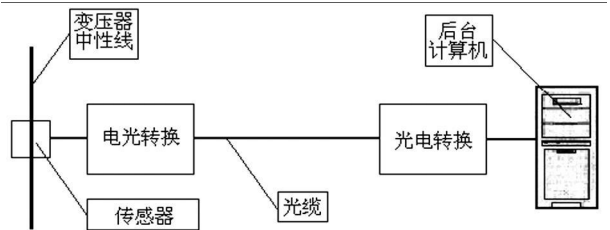


图 3 动态补偿装置原理图

目前尚无中性点直流的动态补偿装置相关的研究。还有一些其他研究采取了直流的电流补偿法的思路,向地网注入电流来升高或降低地网电位,以减小两变电站地网间的电位差。注入电流时要注意地

网、避雷线及变电站其他设备的分流影响,对补偿容量的合理控制是该方法的难点。该补偿法适用于直流较小的场合,它的补偿调节的控制过程比较复杂,应避免出现电流的过补偿。

目前尚无直流偏磁动态补偿装置相关的研究,可将增加该装置的输出接口、提供报警、启动和闭锁等功能,与反向直流电流发生装置和远端独立接地体等设备,构成一个完整的限制变压器中性点直流电流的装置。动态补偿装置完善了中性点补偿电流法,能够避免出现欠补偿和过补偿,可以在直流偏磁严重的变电站使用,但由于制造成本的问题,大面积推广必然会增加资金投入,建议在直流接地极附近的交流系统使用动态补偿装置和接小电阻法相结合,形成高低搭配,既能有效解决直流偏磁问题,又不至于使成本太高。

### 3 变压器中性点接小电阻法

在直流偏磁严重的变压器接入小电阻可有效抑制流入该变压器的直流量,且接入小电阻成本低,易于推广应用<sup>[30]</sup>,但可能会导致附近其他变压器中性点直流超标,因此,要以整个目标电网的变压器的直流量都不超过承受限度为目的,对接入的小电阻进行全网考虑,达到既消除了直流量超标变压器的直流偏磁的问题,又不会将直流接地极电流转移到电网中其他变电站的变压器中。另外,要研究中性点接入小电阻后的雷电过电压、内部过电压、对系统继电保护的影响、小电阻的参数选取原则及其保护。

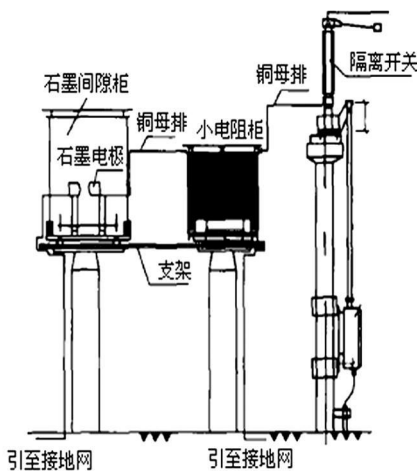


图 4 变压器中性点接小电阻

变压器接小电阻后,应校核变压器中性点的过电

压是否在安全的范围内,需考虑的过电压包括:雷电过电压、短路过电压、操作过电压等。文献 [30] 以春城站为例,对主变压器中性点串接电阻器后雷电过电压、工频过电压和操作过电压 3 个方面进行了校核。

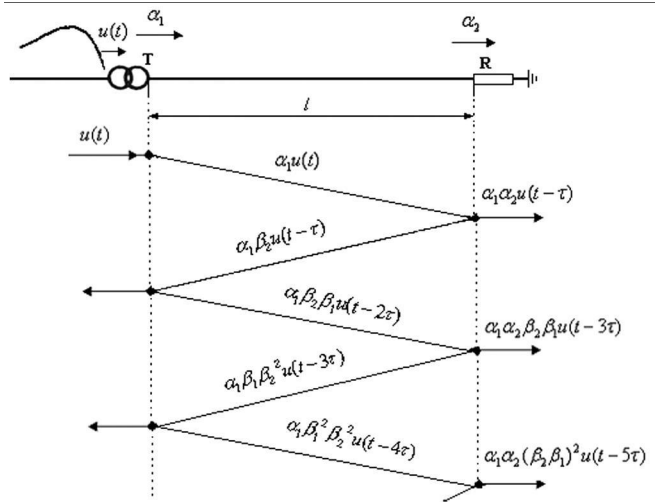


图 5 雷电波侵入变压器中性点的电压行波网络图

雷电侵入波从变压器传播到小电阻时,会发生折反射,进入小电阻的是折射波。折射波与侵入波的关系与变压器和电阻器的暂态阻抗比值紧密相关。由于变压器暂态阻抗通常可达前者的几百、甚至上千欧,而接入电阻的暂态阻抗很小只有几欧姆,因此实际上折射波很小,中性点电位不会因为接入小电阻而提高很多。

实际中短路发生的位置是随机的,导致由短路产生的过电压也不相同,应按最严重的情况进行仿真计算,即短路发生在近端线路。单相短路故障在所有故障中占 65% ~ 70%。随着电网容量的增加,架空输电线间距离的增大,单相短路故障所占比率也将增大。由于两相短路、三相短路无零序电流产生,故分析时可不予分析。应重点分析变压器所在变电站附近线路发生单相短路时产生的过电压。

### 4 其他抑制直流偏磁的方法

采用深层接地极和多条直流输电共用接地极也能减小接地极电流对变压器的影响<sup>[31-33]</sup>。在分析直流偏磁下变压器铁心内电磁分布特点的基础上,也可以采用优化变压器内部设计的方法,改善直流偏磁时变压器内部的漏磁分布,减少损耗,从而降低过热点,达到削弱直流偏磁效应,即局部过热、振动、噪声的目的。

的,提高变压器承受直流偏磁的能力<sup>[34, 35]</sup>。

## 5 结 论

高压直流输电单极大地回路运行产生的地电流会导致变压器直流偏磁,干扰变压器的安全稳定运行。目前抑制流入变压器中性点的直流量相关措施的研究主要有 3 种,即串接电容、接动态补偿装置、串接电阻。串接电阻法简单实用、经济性好,便于在直流接地极附近交流系统推广应用,但要以整个交流电网中变压器中性点直流量不超标为目标,进行变压器接小电阻的合理配置。动态补偿装置能够避免出现欠补偿和过补偿,可以在直流偏磁严重的变电站使用,但由于制造成本的问题,不宜大面积推广。建议在直流接地极附近的交流系统使用动态补偿装置和接小电阻法相结合,形成高低搭配,既能有效解决直流偏磁问题,又兼顾了经济性。另外,变压器内部结构的优化设计和多条直流输电线路共用接地极也能起到抑制直流偏磁的作用。

## 参考文献

[1] 国家电网公司. 溪洛渡、向家坝水电站输电方案优化论证报告 [R]. 北京: 国家电网公司, 2005.

[2] 中国电力工程顾问集团公司. 金沙江一期溪洛渡、向家坝水电站送电华东、华中 ±800 kV 特高压直流输电工程可行性研究报告 [R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.

[3] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1—12.

[4] Liang X M, Liu Z H, Wang S W, et al Planning of UHVDC Transmission System in China [C]. Asia Pacific Region T&D Conference Dalian, China 2005.

[5] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1—8.

[6] 吴广宁, 蒋伟, 曹晓斌. 现代高压电力工程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[7] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[8] 蒋伟, 吴广宁, 黄震, 等. 特高压直流输电的地中电流对变压器的影响及其计算 [J]. 高压电器, 2008, 44(6): 534—536, 540.

[9] Jiang W ei, W u Guangning, X iao Hua, Huang Zhen, Saleh

Yahya Muhammed Effects of Transformer DC Bias and the Relationship between UHVDC Grounding Current and Grounding Resistances [J]. High Voltage Engineering 2008, 34(12): 2530—2535.

[10] A. Fardoun, E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum. Experimental Analysis of a DC Bucking Motor Blocking Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1994, 9(1): 88—99.

[11] P. Picher, L. Bolduc, A. Dutil et al. Study of the Acceptable DC Current Limit in Core-forms Power Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1997, 12(1): 257—265.

[12] D. H. Boteler, R. M. Shier, T. Watanabe et al. Effects of Geomagnetically Induced Currents in B. C. Hydro 500kV System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1989, 4(1): 818—823.

[13] 王艳艳. 大规模电网 GIC 治理方法和技术的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2009.

[14] Philip R. Price. Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2002, 17(4): 1002—1008.

[15] D. Tousignant, L. Bolduc, A. Dutil. A Method for the Indication of Power Transformer Saturation [J]. Electric Power Systems Research 1996, 115—120.

[16] L. Bolduc, A. Gaudreau, A. Dutil. Saturation Time of Transformers under DC Excitation [J]. Electric Power Systems Research 2000, 95—102.

[17] Shu Lu, Yili Liu, Jaime De La Ree. Harmonics Generated From A DC Biased Transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1993, 8(2): 725—731.

[18] Shu lu, Yili Liu. Study of Power Transformer Excitation under GIC [J]. Proceedings of the 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems Detroit 1993, 879—882.

[19] Shu Lu, Yili Liu. FEM Analysis of DC Saturation To Assess Transformer Susceptibility To Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Trans on Power Delivery 1993, 8(3): 1367—1376.

[20] Nobuo Takasu, Tetsuo Oshi. An Experimental Analysis of DC Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1994, 9(2): 1173—1182.

[21] Y. You, E. F. Fuchs, P. R. Bames. Reactive Power Demand of Transformers with DC Bias [J]. IEEE Industry Applications Magazine 1996, (7—8): 45—52.

[22] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 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

[23] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.

[24] 赵杰, 曾嵘, 黎小林. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.

[25] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.

[26] 王新丽. 系统中性点接地方式的选择 [J]. 电工技术, 2008(9): 70-71.

[27] 朱天游. 500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15-18

[28] 陆国庆, 姜新宇, 江健武, 等. 110 kV 及 220 kV 系统变压器中性点经小电抗接地方式的研究及其在应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 70-74.

[29] 杜忠东, 董晓辉, 王建武, 等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 69-72.

[30] 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): 88-90.

[31] 郑健超, 刘曲, 李立涅. 深层接地极对直流偏磁影响的研究 [J]. 陕西电力, 2007, 35(6): 1-6.

[32] 陈凡, 曹林, 赵杰, 等. 云广与贵广 II 回直流输电系统共用接地极设计 [J]. 高电压技术, 2006, 32(16): 154-157.

[33] 孙帮新, 陈辉祥. 高压直流输电共用接地极技术研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 150-153.

[34] 朱成鼎. 三相五柱式铁心磁通的计算 [J]. 变压器, 1997, 34(1): 16-20.

[35] O. Biro. On the Use of the Magnetic Vector Potential in Finite Element Analysis of 3D Eddy Currents [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1989, 25(4): 3145-3159.

作者简介:

蒋伟 (1979), 男, 博士, 主要从事高电压绝缘技术方面的研究。

吴广宁 (1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备在线监测及故障诊断、电力系统及自动化、高速机车牵引电机绝缘技术等方面的研究。

(收稿日期: 2011-03-14)

(上接第 8 页)

[2] 吴军基, 丁宁, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-16.

[3] 刘严, 谭忠富, 乞建勋. 峰谷分时电价设计的优化模型 [J]. 中国管理科学, 2005, 5(13): 87-92.

[4] 谭忠富, 王绵斌, 等. 峰谷分时电价优化模型及其模糊求解方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 9(9): 145-151.

[5] 曾绍伦, 任玉珑, 李俊. 基于博弈论的分时电价模型及其仿真 [J]. 华东电力, 2007, 8(35): 40-43.

[6] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 20(29): 10-14.

[7] Yuan Jia-hai. Customer Response Under Time-of-Use Electricity Pricing Policy Based on Multi-Agent System Simulation [C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006, 814-818.

[8] 胡福年, 汤玉东, 邹云. 考虑双边价格联动的峰谷分时电价机理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 25(27): 61-66.

[9] Emre Celebi and J. David Fuller. A Model for Efficient

Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 60-67.

[10] 谭忠富, 王绵斌, 等. 发电侧与供电侧峰谷分时电价联动的分级优化模型 [J]. 电力系统及自动化, 2007, 21(31): 26-34.

[11] 谭忠富, 陈广娟, 等. 以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 1(29): 55-62.

[12] 齐放, 张粒子, 等. 基于拉姆齐定价理论的销售电价研究 [J]. 电力需求侧管理, 2010, 2(12): 24-27.

[13] Jean-Jacques Laffont, Jean Tirole. Competition In Telecommunication [M]. POSTS & TELECOM PRESS, 2002.

作者简介:

李俊 (1981), 男, 博士研究生, 从事电力市场及电力系统稳定与控制研究。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、智能电网、电力系统稳定与控制等方面的研究。

张力 (1982), 男, 博士研究生, 从事电力市场、电力系统稳定与控制研究。

(收稿日期: 2011-02-25)