

基于高频开关电源的反向注入式直流平衡装置的研究及应用

王晓毛¹, 梅桂华¹, 谢应耿²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510075; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为了有效抑制变压器中性点电流导致的直流偏磁现象, 提出了一种新型电流抑制装置, 并从结构、工作原理和参数设计方面详细介绍了该装置的运作特性。该装置根据反向注入法的基本原理, 采用了高频开关电源作为注入电流源, 可显著提高装置对中性点电流的响应速度, 从而减小带来的损失。为防止装置发生过补偿现象, 利用 PLC 模块作为监测控制系统, 根据监测的直流电流情况, 通过控制逻辑自动调节电源输出的电流, 保持中性点电流小于预设的定值, 达到抑制直流偏磁的目的。模拟试验和现场试运行的结果表明, 装置可以很好地平衡变压器中性点直流电流, 保证流入变压器的直流电流在预设范围内, 不误动, 可靠性能满足实际工程需要。

关键词: 高频开关电源; 反向直流注入; 变压器中性点直流; 直流偏磁

Research and application of reverse injection DC-balancing device based on high-frequency switching power supply

WANG Xiaomao¹, MEI Guihua¹, XIE Yinggeng²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510075, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to suppress the DC magnetic bias caused by transformer neutral point DC effectively, this paper proposes a novel reverse DC injection device based on high-frequency switching power supply, and introduces the structure and working principle of device in detail. This object uses the modular high-frequency switching power as the injected source, and takes advantage of PLC to monitor and control the system, so the device not only can react the magnetic bias rapidly and accurately but realize the real-time monitoring and compensate the transformer neutral point DC. After simulation test and field operation, the result shows that the device does well in balancing transformer neutral point current, and guarantees the current stay in the preset range. So the reliable performance of device can meet the actual needs of the project.

Key words: high-frequency switching power supply; reverse DC injection; transformer neutral point DC; DC magnetic bias

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0139-06

0 引言

高压直流输电系统在大地回线运行方式下, 大量直流将会通过直流接地极流入大地, 并形成直流电场, 导致直流电流经中性点流入变压器, 引起变压器直流偏磁现象^[1-3]。在相关文献的仿真分析中发现: 直流偏磁现象不利于电网的安全运行, 一方面改变铁心磁化曲线使变压器发生饱和, 变压器噪声、震动增大^[4-5]; 另一方面励磁电流的畸变使变压器成为一个谐波源, 大量的谐波对电网保护设备带来一定的影响^[6-9]。

大地中的直流电流是变压器直流偏磁的主要诱因, 地中电流主要由地磁感应电流和直流接地极入地电流组成^[10-11]。直流偏磁现象普遍存在, 并且威胁着变压器的正常运行, 所以对于直流偏磁的抑制具有重要意义^[12]。根据国内外关于直流偏磁抑制方式研究的进度, 目前受到学者们认可的抑制直流方法主要有^[11,13-16]: 串小电阻法、电容隔直法、电位补偿法和反向注入法。

江苏 500 kV 武南变电站投运一种新研制的反向直流电流注入装置, 其主要原理是电源经调压器调压后再经硅整流经辅助接地极和变压器中性点回

路向变压器中性点注入反向直流电流。其调压器为电动机械式，在响应速度方面会受到限制^[17]。本文在反向注入法的基础上提出了一种新型的基于高频开关电源的直流抑制装置，该装置采用电力电子开关电源作为电流注入源，并且结合 PLC 监测控制系统，实现了对变压器中性点直流进行实时监测和精确补偿。响应速度快，效率高、体积小是装置的特点。装置经过现场试运行，运行情况良好，结果表明装置能较好地低主变中性点的直流电流。

1 中性点电流反向注入法

1.1 反向注入法原理

反向电流注入法的基本原理是在变压器中性点串入一个可控反向直流电流源，如图 1 所示，装置装设于变压器中性点和接地电阻 R_M 之间，控制器通过 CT 监测中性点电流和直流电源电流，对补偿程度进行调节。通过在变电站地网与辅助接地极之间注入直流电流从而改变变压器中性点电位，以全部或部分消除流入变压器绕组的直流电流为目的，直观而形象地被称为直流电流反向注入法。

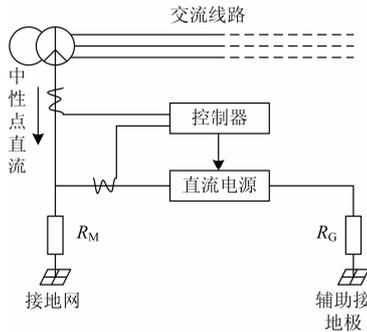


图 1 反向注入式装置原理示意图
Fig. 1 Diagram of reverse injection device

这种方法的优点是在变压器中性点与地网之间无其他设备接入，能保证变压器中性点可靠接地而无过电压问题；对系统现有保护配置不产生影响；针对不同的中性点流入的直流电流值，可以动态地选择注入不同的反向电流，具有灵活性。

1.2 分流系数

在反向电流注入装置中，引入一个重要的参数，分流系数 k 。流入变压器绕组的电流只占直流电流平衡装置输出电流的一部分，它所占的比例称为注入装置的分流系数。直流电流平衡装置的最大输出电流取决于变压器的最大直流偏磁电流以及分流系数。

图 2 所示为反向注入装置接入后电流的分布情况。装置的输出电流 I_j 在 A 点分流：一部分(I_{jT})注

入中性点作为抵消变压器中性点电流的反向电流，该电流经过变压器、输电线、远方接地点 G3 及大地返回装置的接地极 G2；另一部分(I_{jG})从变压器中性点流入接地点 G1，通过大地返回 G2。则分流系数定义为

$$k_i = \frac{I_{jT}}{I_j} = 1 - \frac{I_{jG}}{I_j} \quad (1)$$

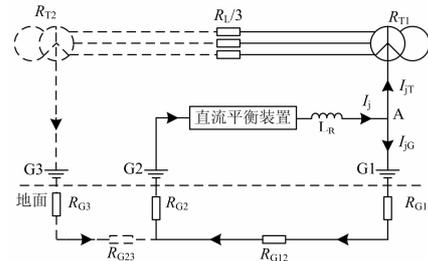


图 2 系统电流分布示意图
Fig. 2 Diagram of current distribution

图中： I_j 、 I_{jT} 和 I_{jG} 分别为平衡装置补偿的电流、注入变压器中性点的电流和流入大地的电流； R_{T1} 和 R_{T2} 为变压器的等值直流电阻； R_L 为交流电网线路的等值直流电阻； R_{G1} 、 R_{G2} 和 R_{G3} 为接地电阻； R_{G12} 和 R_{G23} 为接地极之间的土壤电阻； L_R 为限流电抗器。

结合式(1)和图 2 可以将分流系数表达式具体化为

$$k_i = \frac{I_{jT}}{I_j} = \frac{R_{G1} + R_{G12}}{Z + R_{G1} + R_{G12} + R_{G23}} \quad (2)$$

其中， $Z=R_{T1}+R_L/3+R_{T2}+R_{G3}$ 。一般来说， R_{T1} 、 R_{T2} 、 R_L 、 R_{G1} 和 R_{G3} 都是相对固定的值，因此通过改变辅助接地极 G2 的位置来改变分流系数，即改变 R_{G12} 和 R_{G23} 的大小，可获得期望的分流系数。

当变压器中性点有峰值为 I_{gmax} 的电流流入，变压器发生直流偏磁现象，此时装置为了抑制该中性点电流，最大输出电流应为

$$I_{jmax} \leq \frac{I_{gmax}}{k_i} \quad (3)$$

式中： I_{jmax} 为平衡装置输出的最大反向电流； k_i 为分流系数。由式(3)可见，直流电流平衡装置的最大输出电流取决于变压器的最大直流偏磁电流以及分流系数。最理想状态是分流系数 k_i 等于 1，即装置输出的直流电流完全用于补偿地中直流，装置电流的利用率达到 100%，但是根据实际工程运行的经验来看，各参数的选取需从技术和经济的角度来考虑，比如：装置的最大输出电流与分流系数相关，理想情况是把辅助接地极接到无穷远处，使分流系

数接近于 1, 但实际上还需要考虑输电线的耗费和辅助接地极的选址问题; 装置的最大输出电压和功率与 R_{G2} 相关, 若某花岗岩地带的变电站预备接入装置, 土壤电阻率较高, 则 R_{G2} 的值要小, 但所需费用较高。一般实际选取的辅助接地极 G2 距 G1 直线距离约 3 km, 分流系数测量值约为 27%~30%, I_{gmax} 为 40 A, 取 R_{G3} 为 0.2 Ω 、 R_{G1} 为 0.5 Ω , R_{G2} 在不大于 2.8 Ω 时, 装置的最大输出电流和电压至少要取为 150 A 和 500 V。

2 直流平衡装置的研制

2.1 装置控制原理

直流电流平衡装置的基本原理就是通过检测变压器中性点上的直流电流的方向和大小, 调节直流电流平衡装置的输出电流的方向及大小, 控制目标就是将变压器中性点直流电流减小到一预设的范围内。直流电流平衡装置控制流程见图 3。

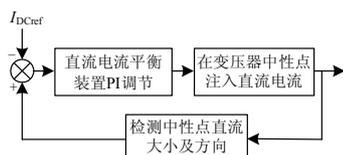


图 3 平衡装置控制流程示意图

Fig. 3 Balancing device control flow diagram

2.2 平衡装置的结构

装置的人工控制部分现场图如图 4 所示。由图 5 可将本装置分为如下三大部分:

(1) 高频开关电源模块并机系统

高频开关电源模块并机系统由 8 台模块电源、电源监控器及直流输出换向器等组成, 主要实现直流电流的平滑输出及自动闭环控制调节。



图 4 控制装置现场图

Fig. 4 Picture of control device

8 个 30 A/500 V 的 PWM 高频开关电源模块并联运行, 其中 6 个正常工作, 2 个为冗余, 可提供

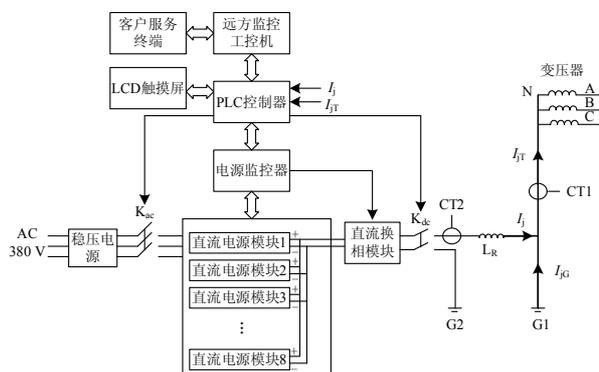


图 5 直流电流反向注入装置结构图

Fig. 5 Diagram of reverse DC current injection device structure

从 0 A 到 240 A 连续调节的直流电流。在所有模块都正常时, 每个模块输出相同的电流, 以保证相同的运行条件和使用寿命。如果某一模块出现故障而退出运行, 其余模块将担负该模块的输出电流。

(2) 就地/远方监控系统

就地监控系统由 PLC 控制器、液晶触摸屏、AD 转换模块、DA 转换模块及串行口通信模块等组成, 主要实现对外的人机界面操作、与远方监控系统的联系及对模块电源并机系统的控制。

PLC 控制器实时检测流入中性点的直流电流, 一旦超出设定值, 即启动比例积分(PI)环节进行计算, 将计算结果作为指令发给电源监控器, 要求电源模块和直流换向模块输出指定的直流电流。为了防止地中直流突然消失, 反向注入的直流造成变压器更严重的直流偏磁, 装置注入变压器的直流电流不能超过变压器直流偏磁电流的最初数值。

装置以 LCD 触摸屏和远方监控工控机作为就地和远方的人机界面, 它们之间通过光纤通信, 与变电站的远方监控机进行通信, 该客户服务终端软件可远方查看现场装置的工作状态、实时监测数据、历史数据和记录。

(3) 就地监测保护系统

就地监测保护系统由单独的 PLC 控制器(不同于就地监控系统中的 PLC)、AD 采样模块等组成, 主要实现对直流电源输出及变压器中性点电流等进行独立监测, 判断就地装置系统运作情况, 一旦出现故障情况及时切断直流电源交流输入及直流输出开关。当 PLC 判断装置处于危急状态时, 可以控制交流开关和直流开关跳闸。

为了抑制中性点故障电流流入装置, 在装置的输出端串接一限流电抗器 L_R 。

2.3 控制方式及参数

主变中性点装设该装置后，在发生直流偏磁现象时，装置可以采取两种工作方式：(1) 自动工作方式。直流电流注入装置自动检测变压器中性点直流电流的大小及方向，根据设定的参数自动投切交流电源开关及直流输出开关，并自动完成直流电流的调节，当直流电流调节器输出电流达到其额定值仍不能满足调节目标时，则停止继续增加输出电流，保持输出额定电流，并报警。(2) 手动工作方式。运行人员根据检测到的变压器中性点直流电流判断是否需要投入直流电流注入装置，当需要投入直流电流注入装置时，人工投入交流电源开关及直流输出开关，并且可以根据检测到的直流电流大小手动调节注入电流。

在投运中的直流发生器应满足快速补偿中性点直流的要求，并保证补偿精度，以免造成更严重的直流偏磁现象，还要在必要时发出报警信号。装置的相关参数如下：

(1) 投入门槛值及越限时间门槛值

可以设定装置投入门槛值及越限时间门槛值，当变压器中性点直流电流超过此门槛值并且超过时间达到设定的越限时间门槛值时，合上直流电流注入装置的交流电源开关及其直流输出开关，此项设定值功能是防止因干扰信号引起的装置频繁投入。

(2) 控制目标值

一旦启动投入直流电流注入装置的交流电源开关及直流输出开关，直流电流注入装置将以这一设定值作为控制目标来平衡变压器中性点的直流电流，使平衡后的变压器中性点直流电流小于该控制目标值。

(3) 注入电流报警值

当注入电流超过注入电流报警值时进行报警和保护，防止异常情况发生。

(4) 跟踪时间

可以设定直流电流平衡装置跟随变压器中性点直流电流的响应时间。

(5) 测量 CT 误差报警值

在变压器中性线直流电流的测量上采用两个独立直流电流测量 CT。在控制器上比较两个测量值，当两个测量值相差等效达到测量 CT 误差报警值(3 A)时，发出报警信号。

3 中性点注入反向直流的效果分析

3.1 模拟实验

受试验条件限制，直流电流平衡装置的模拟试验分两个阶段进行。

第一阶段试验未考虑分流系数的影响，即未接入远方接地极。此次试验验证了装置的大电流自动控制功能，用一台大功率主流电流源输出可调节大小和方向的直流电流作为地中直流。装置在自动控制模式和误差绝对值设定在 5 A 下的部分试验结果如表 1 所示。

表 1 大电流自动控制功能试验结果

Table 1 Test results of large current automatic control function

序号	1	2	3	4	5	6	7
I_G/A	0	-60	-120	-180	60	120	180
I_f/A	0	57.3	117.2	117.9	-57.5	-116.1	-177.0
I_T/A	0	-2.71	-2.82	-2.09	2.48	3.91	2.95

注：表中 I_G 为地中直流， I_f 为装置输出电流， I_T 为变压器中性点电流。

从表 1 可见，装置的自动注入功能良好，实际误差在设定误差之内，而且注入电流量小于直流源输出电流量，避免了在地中直流突然消失的情况下造成更严重的直流偏磁现象。

第二阶段试验接入了远方接地极。此次试验验证了装置的小电流自动控制功能和手动控制功能，测试了流入变压器的直流分流系数。在自动控制模式下且误差绝对值设定 3 A，经过补偿后的注入变压器的直流电流在 3 A 以内，满足要求。在手动控制模式下，分流系数如表 2 所示。

表 2 分流系数的试验结果

Table 2 Test results of shunt coefficient

序号	1	2	3	4	5	6	7
I_G/A	-15	-10	-5	3	5	10	15
I_f/A	-15.75	-10.30	-5.20	2.92	4.60	8.75	14.55
I_T/A	-5.2	-3.4	-1.3	1.1	1.7	3.2	5.3
$k/\%$	33	33	25	38	37	37	36

注： k 为分流系数。

当辅助接地极距变压器中性点约 3 km 时，分流系数为 30% 左右，实验的测量结果基本符合要求。

3.2 装置运行曲线

该装置曾于惠州市义和站挂网试运行，根据监测记录，在试运行的一年半时间内，由于电网结构的变化导致义和站只有三次中性点电流越限的记录。虽然直流偏磁程度均不严重，但装置均能及时准确地抑制中性点之流。装置后期正式投运，从监测的数据观测，装置在较大直流电流(10 A)的干扰下能有效进行抑制，减小直流偏磁带来的损失。下面列举了两次装置动作记录曲线，记录曲线如图 6、图 7 所示。

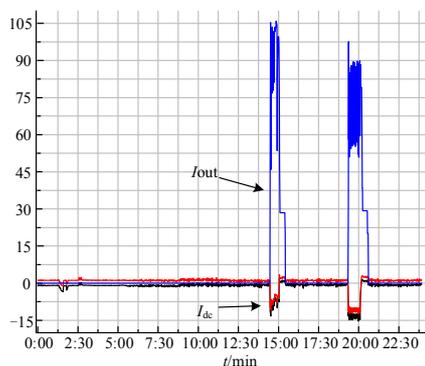


图 6 2013 年 1 月 10 日的动作曲线

Fig. 6 Action curve of January 10, 2013

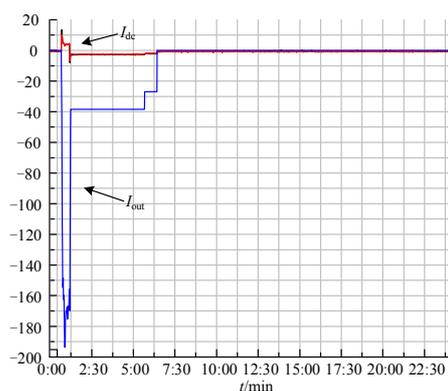


图 7 2013 年 6 月 10 日的动作曲线

Fig. 7 Action curve of June 6, 2013

图 6、图 7 中分别表示装置通过电流互感器检测到的中性点电流曲线(I_{dc})和直流电流平衡装置的直流电流输出曲线(I_{out})。以图 6 为例, 当天发生两次中性点电流越限, 时间分别为 14:30 和 19:30, 中性点电流达到 13 A 左右, 监测装置检测到电流越限, 装置开始反向补偿中性点电流, 此变压器中性点电流回落至安全范围。直到直流偏磁现象解除, 装置停止补偿电流, 变压器中性点电流恢复正常。根据图中曲线可知, 当直流偏磁较为严重时, 反向电流补偿法需要补偿较大的电流才可以达到抑制的效果。

4 总结

(1) 直流电流平衡装置的输出电流能够自动跟踪主变中性点的直流电流变化, 经平衡补偿后的变压器中性点直流电流不超过 3 A, 且此时的直流电流方向与平衡装置补偿前的直流电流方向相同。这说明装置的自动跟踪精度达到设计要求, 不会过补偿, 一旦地中直流消失, 反向注入的直流也不会造成变压器更严重的直流偏磁。

(2) 与机械式调节输出电流的方式比较, 在直流电流注入法中采用电力电子开关电源的方案使得闭环控制的响应速度大幅提高(尽管更高的响应速度不是直流偏磁抑制措施追求的目标), 电力电子器件的应用也使快速的闭环控制成为可能。同时, 在装置设计中考虑了适当的冗余及安全措施, 可以满足电力生产的安全性。

参考文献

- [1] EITZMANN M A, WALLING R A, HUYNH H, et al. Alternatives for blocking direct current in AC system neutrals at the Radisson/LG2 complex[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1328-1337.
- [2] PICHER P, BOLDUC L, DUTIL A, et al. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 257-265.
- [3] 李泓志, 崔翔, 刘东升. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
LI Hongzhi, CUI Xiang, LIU Dongsheng. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [4] 董霞, 刘志珍, 宁大海. 基于传输线模型的三相变压器直流偏磁仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 12-16.
DONG Xia, LIU Zhizhen, NING Dahai. Simulation study for the three-phase transformer under DC bias based on the transmission-line model[J]. Power System Protection and control, 2012, 40(23): 12-16.
- [5] 赵小军, 李琳, 程志光. 基于直流偏磁实验的叠片铁心磁化特性分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 7-13.
ZHAO Xiaojun, LI Lin, CHENG Zhiguang. Analysis of magnetizing characteristic of laminated core based on DC-biasing experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 7-13.
- [6] 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.
ZHANG Xuesong, HUANG Li. Simulation analysis of DC magnetic bias induced current of transformer based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and control, 2012, 40(19): 78-84.
- [7] 李贞, 李庆民, 李长云, 等. 直流偏磁条件下变压器的谐波畸变特征[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 52-55.
LI Zhen, LI Qingmin, LI Changyun, et al. Harmonic distortion feature of AC transformers caused by DC

bias[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 52-55.

[8] 朱林, 韦晨, 余洋. 单相变压器的直流偏磁励磁电流问题及其对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 158-162.
ZHU Lin, WEI Chen, YU Yang. Analysis of DC bias exciting current of the single-phase transformer and its effect on protection[J]. Power System Protection and control, 2010, 38(24): 158-162.

[9] 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, 25(3): 9-14.
WANG Mingxin, ZHANG Qiang. Analysis on influence of ground electrode current in HVDC on AC power network[J]. Power System Technology, 2005, 25(3): 9-14.

[10] 薛向党, 郭晖, 郑云祥, 等. 地磁感应电流对电力变压器危害的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(2): 13-19.
XUE Xiangdang, GUO Hui, ZHENG Yunxiang, et al. Studying of hazards of geomagnetic induced current on power transformers[J]. Proceedings of the CUS-EPSA, 1999, 11(2): 13-19.

[11] 苑舜, 王天施. 电力变压器直流偏磁研究综述[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 83-87.
YUAN Shun, WANG Tianshi. Summary of research on transformer DC magnetic bias[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 83-87.

[12] 曾嵘, 张波, 赵杰, 等. HVDC 地中直流对交流系统的影响及规律分布[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 678-682.
ZENG Rong, ZHANG Bo, ZHAO Jie, et al. Influence and characteristics analysis of effect of the HVDC ground return current on AC system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 678-682.

[13] 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.
ZHAO Jie, LI Xiaolin, LÜ Jinzhuang. Applying series resistor to restrain power transformer DC biasing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 88-90.

[14] 王振浩, 佟昕, 齐伟夫. 电容隔直可控开断桥法抑制变压器直流偏磁[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 120-126.
WANG Zhenhao, TONG Xin, QI Weifu. Blocking DC capacitor controllable opening and broken bridge suppression in transformer DC magnetic bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 120-126.

[15] 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.
HUANGFU Cheng, RUAN Jiangjun, ZHANG Yu. DC magnetic bias induced current effect on transformer and restricting methods[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 117-120.

[16] 马志强. 消减变压器中性点直流电流抑制直流偏磁的电位补偿法[J]. 广东电力, 2007, 20(5): 1-5.
MA Zhiqiang. A potential compensation method to eliminate transformer neutral direct current produced by HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(5): 1-5.

[17] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.
KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and handing of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 81-82.

收稿日期: 2014-07-07; 修回日期: 2014-09-22

作者简介:

王晓毛(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变压器直流偏磁方面的研究; E-mail: wangxiaomao@139.com

梅桂华(1963-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统及电能质量分析;

谢应耿(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事变压器直流偏磁方面的研究。

(编辑 葛艳娜)