

# 直流输电接地极电流对不同结构变压器影响研究

余洋<sup>1</sup>, 韦晨<sup>2</sup>, 朱林<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 攀枝花 617000;  
3. 德阳电业局, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 利用 PSCAD/EMTDC 软件建立系统模型, 仿真了直流感地极电流对组式、三相三柱式和三相五柱式等不同结构变压器的影响。仿真结果表明: 组式变压器由于具有独立的磁通回路, 磁阻小, 受直流偏磁影响最大; 三相三柱式变压器铁芯中无直流通道, 磁阻大, 受直流偏磁影响较小; 而三相五柱式变压器虽有磁回路, 但铁芯面积比单相变压器小, 受直流偏磁影响介于前二者之间。

**关键词:** 变压器; HVDC 输电; 接地极; EMTDC; 直流偏磁

## Impact of HVDC ground electrode current on transformers with different structures

YU Yang<sup>1</sup>, WEI Chen<sup>2</sup>, ZHU Lin<sup>3</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. Ertan Hydropower Development Company, LTD, Panzhihua 617000, China;  
3. Deyang Electric Power Bureau, Deyang 618000, China)

**Abstract:** The paper adopts PSCAD/EMTDC software to establish the system model and simulates the impact of DC ground electrode current on transformers of different structures including group transformer, three-phase three pole transformer, and three-phase finepole transformer, etc. The results show that because of the independent magnetic flux circuit and small reluctance, group-type transformer is most influenced by DC bias; three-phase three-pole transformer which has no DC circuit and has larger reluctance is least-affected by DC bias; three-phase five-pole transformer in which area of iron core is smaller than that of single-phase transformer is impacted between the former two even though having DC circuit.

**Key words:** transformer; HVDC transmission; ground electrode; EMTDC; DC bias

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0071-06

## 0 引言

截止 2009 年 10 月底, 仅国网公司就已建成 6 个跨区直流输电系统。目前, 我国拥有的直流输电系统容量占全世界的 14.37%。HVDC 输电对于实现远距离电能输送起到了十分积极的作用<sup>[1-2]</sup>。

直流输电系统的运行方式包括两极直接构成回路、单极或双极以大地或金属构成回路等<sup>[3-4]</sup>。我国很多接地极的额定入地电流能达到 3 kA, 如果 HVDC 输电采用单极大方式运行, 3 kA 直流将对接地极附近的交流电网产生影响, 其中一部分直流电流从一端变压器中性点流入, 再从另一端变压器中性点

流出<sup>[5]</sup>。现场测试表明<sup>[6-7]</sup>只需很少的直流电流流过变压器中性点就会严重危害变压器甚至影响交流电力系统的正常运行。因此, 变压器的直流偏磁问题越来越受到国内学者的重视<sup>[8-11]</sup>。

本文在 PSCAD/EMTDC 中建立了系统模型, 对组式、三相三柱式和三相五柱式等不同结构变压器受直流偏磁的影响做了详细的仿真, 分析了直流偏磁对各种结构变压器励磁电流和主磁通的影响。

## 1 系统仿真模型介绍

设待研究的系统为简化的双端长距离供电系统, 有两台中性点接地变压器, 如图 1 所示, 其中,  $U_{dc}$  为两变压器中性点之间的直流电位差。建立系统模型分析如下:

(1) 电源<sup>[12]</sup>。等值系统 A 和 B 容量均为

基金项目: 华北电力大学(保定)青年教师科研基金项目  
(200911001)

150 MVA, 电压为 220 kV, 系统等值内阻不为零, 电源 A 等值电压相角超前电源 B 的相角为  $1^\circ$ 。

(2) 输电线路。用分布参数表示, 长度取 100 km。

(3) 接地系统。由于关心的是每相励磁电流平均值与磁通和电流波形之间的关系, 而不是研究电流与中性点间直流电位差之间的关系, 所以取接地电阻为零。

(4) 变压器。研究的对象为送电侧变压器 T1, 连接组别均取为: Y/d11 型。

(5) 负荷<sup>[13]</sup>。取线路空载进行计算。

(6) 电位差  $U_{dc}$  取值范围<sup>[14]</sup>为 (0, 150 V)。

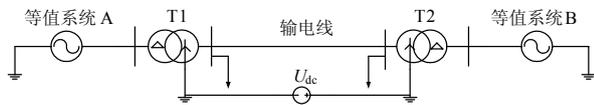


图 1 仿真实例电网简化接线图

Fig.1 Simplified connecting diagram of simulation system

对于直流偏磁作用, 很容易产生的一种误解是: 在正常情况下, 很小的励磁电流就能够产生额定工作磁通, 此时若有一定量的直流流入变压器, 直流所产生的磁通将与原来的交流磁通相叠加, 结果会使主磁通向一侧大大偏移, 造成铁心高度饱和、励磁电流严重畸变。而事实并非如此, 在不同结构的三相变压器中, 对直流偏磁效应敏感度是不同的<sup>[15-16]</sup>。

## 2 直流偏磁对三相组式变压器的影响

图 2 和图 3 为三相组式变压器在不同中性点偏移电压作用下, 系统稳定后的电流波形和三相磁链波形。图 4 为直流偏磁  $U_{dc}=150\text{ V}$  下组式变压器  $Y_0$  侧电压波形。

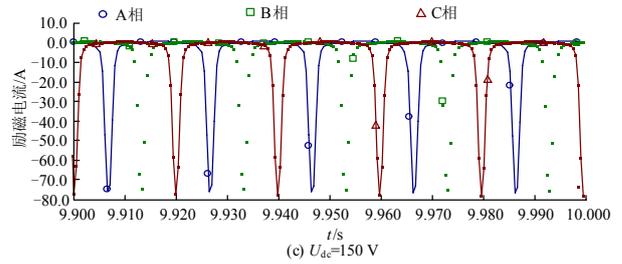
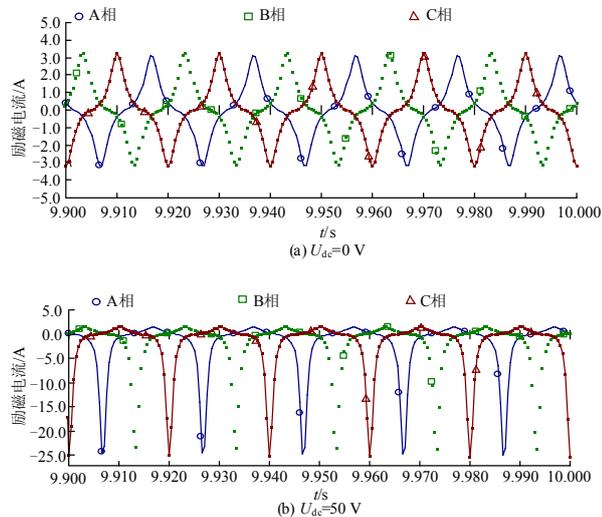


图 2 不同直流偏磁  $U_{dc}$  下励磁电流波形

Fig.2 Exciting current waveform under different DC bias

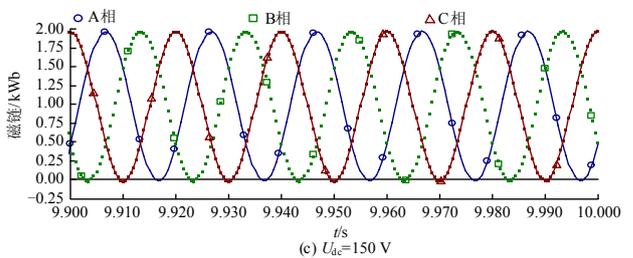
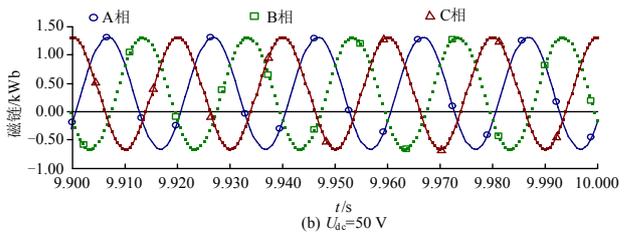
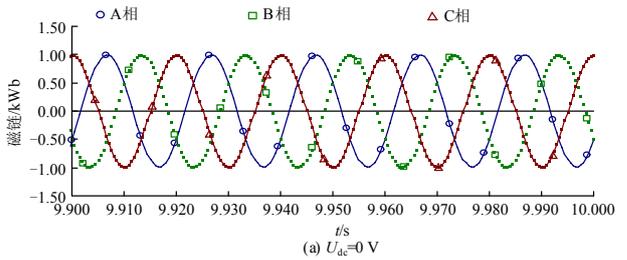


图 3 不同直流偏磁  $U_{dc}$  下磁链波形

Fig.3 Flux linkage waveform under different DC bias

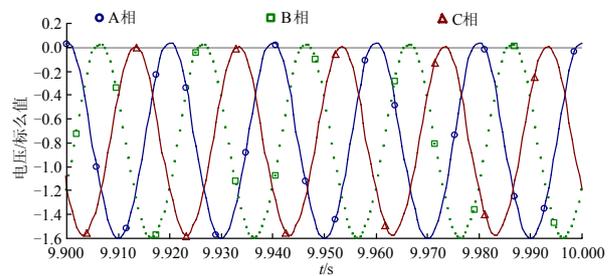


图 4 直流偏磁  $U_{dc}=150\text{ V}$  下组式变压器  $Y_0$  侧电压波形  
Fig.4 Group-type transformer voltage waveform of  $Y_0$  side under different DC bias

表 1 为三相组式变压器空载运行时励磁电流及磁链与变压器中性点直流电压间的关系。

表 1 三相组式变压器励磁电流及磁链与直流电压间的关系

Tab.1 The relation between exciting current magnetic linkage and DC bias of three-phase group transformer

直流电压/ V	直流电流/ A	励磁电流		磁链	
		平均值/ A	有效值/ A	平均值/ Wb	峰值/ Wb
0.0	0.0	0.011	1.5	8.49	993
20	2.03	1.92	5.1	149.3	1 091
50	5.08	4.23	9.8	323	1 314
100	10.2	7.86	15.6	623	1 635
150	15.2	12.23	20.9	971.5	1 967

500 kV 以及 750 kV 主变一般均为单相结构, 此类变压器具有独立的磁回路, 由于磁阻低, 较小的直流就可以引起磁饱和, 并且直流偏磁越大, 励磁电流负半周越来越大, 正半周减小至零 (从图 2 可以看出)。从表 1 也可以看出, 当  $U_{dc}=150\text{ V}$  时, 系统中存在的直流磁链达到 971.5 Wb, 几乎快接近额定磁链 (993 Wb)。因此三相组式变压器绕组只能容许流入较少的直流电流。

### 3 直流偏磁对三相三柱式变压器的影响

在一般的电力系统仿真中, 对三相变压器往往只考虑各相之间电的联系, 很少注意其磁的关联性, 而在三相三柱和三相五柱变压器中, 由于三相磁路相互关联, 各相励磁安匝与磁通之间的关系有较大的区别, 简单地以三个单相磁路等效代替<sup>[17]</sup>, 或者根据经验认为中相等效磁路较短而将三相等效磁路的长度人为地取为不同值<sup>[16]</sup>是不够准确的。本文选用 PSCAD/EMTDC 提供的 UMEC 变压器模型, 它能准确模拟变压器的非线性激磁特性, 并依据变压器的不同结构, 充分考虑变压器饱和状态下饱和磁通在相内、相间的耦合, 这一特点是其他仿真软件所不具备的。

图 5 和图 6 为三相三柱式变压器在不同中性点偏移电压作用下, 系统稳定后的电流波形和三相磁链波形。图 7 为直流偏磁  $U_{dc}=150\text{ V}$  下三相三柱变压器  $Y_0$  侧电压波形。

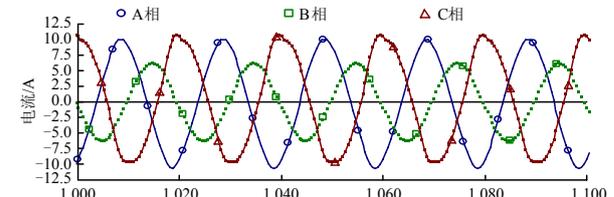
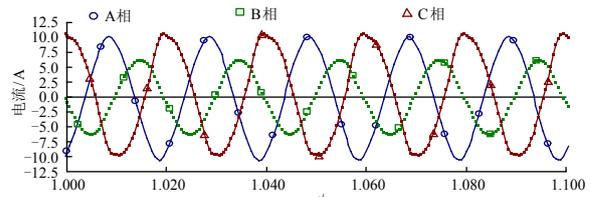
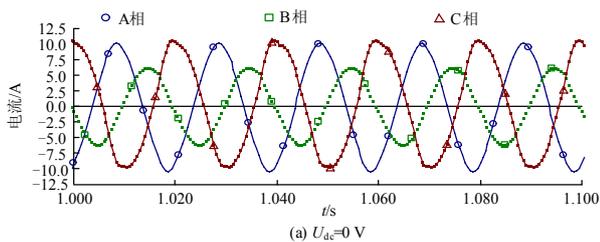
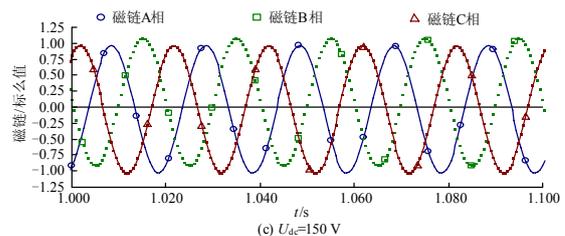
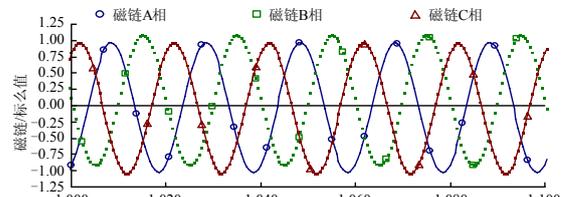
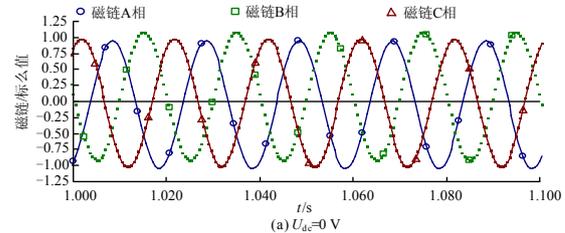
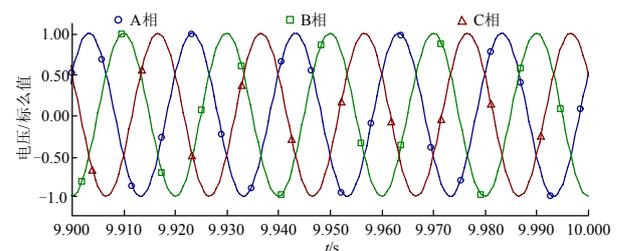
图 5 不同直流偏磁  $U_{dc}$  下电流波形  
Fig.5 Current waveform under different DC bias图 6 不同直流偏磁  $U_{dc}$  下磁链波形  
Fig.6 Flux linkage waveform under different DC bias图 7 直流偏磁  $U_{dc}=150\text{ V}$  下三相三柱变压器  $Y_0$  侧电压波形  
Fig.7 Three-phase three-pole transformer voltage waveform of  $Y_0$  side under different DC bias

表 2 和表 3 分别为三相三柱式变压器 A 相和 B 相励磁电流及磁链与变压器中性点直流电压间的关系。

表 2 三相三柱式变压器 A 相电流及磁链与直流电压间的关系

Tab.2 The relation between A phase current magnetic linkage and DC bias of three-phase three pole transformer

直流电压/V	直流电流/A	电流		磁链	
		平均值/A	有效值/A	平均值/p.u.	峰值/p.u.
0.0	0.0	-0.136	4.010	-0.023	0.96
20	2.05	-0.163	4.011	-0.037	0.97
50	5.15	-0.160	4.011	-0.044	0.97
100	10.3	-0.192	4.012	-0.048	0.98
150	15.5	-0.23	4.013	-0.052	0.99

表 3 三相三柱式变压器 B 相电流及磁链与直流电压间的关系

Tab.3 The relation between B phase current magnetic linkage and DC bias of three-phase three pole transformer

直流电压/V	直流电流/A	电流		磁链	
		平均值/A	有效值/A	平均值/p.u.	峰值/p.u.
0.0	0.0	-0.067	6.605	0.051	1.02
20	2.05	-0.083	6.612	0.051	1.02
50	5.15	-0.092	6.610	0.057	1.025
100	10.35	-0.093	6.612	0.065	1.027
150	15.44	-0.115	6.615	0.072	1.03

对于三相三柱式铁心结构，直流磁通在铁心中无通道，只能经过外壳返回，磁阻较大，所以直流磁通很小，中性点允许通过的直流电流较大。从图 5 (a) 可看出，无直流时，A 相和 C 相励磁电流幅值相同，B 相幅值最小。随着直流偏磁的增大，励磁电流的畸变却不大。从图 5 可看出，当直流电流从 0 增至 150 V 时，三相三柱变压器中只有很小的直流磁链。

#### 4 直流偏磁对三相五柱式变压器的影响

图 8 和图 9 为三相五柱式变压器在不同中性点偏移电压作用下，系统稳定后的电流波形和三相磁链波形。图 10 为直流偏磁  $U_{dc}=150$  V 下三相五柱变压器  $Y_0$  侧电压波形。

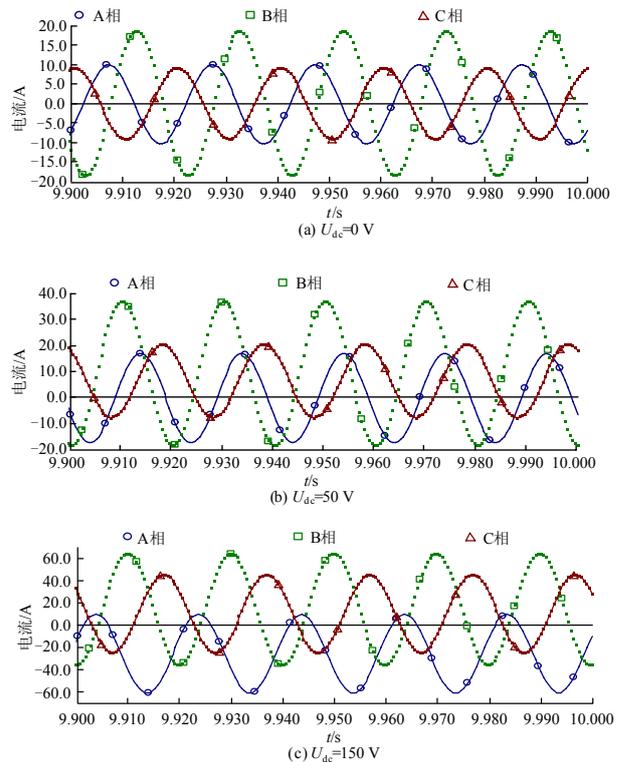


图 8 不同直流偏磁  $U_{dc}$  下电流波形  
Fig.8 Current waveform under different DC bias

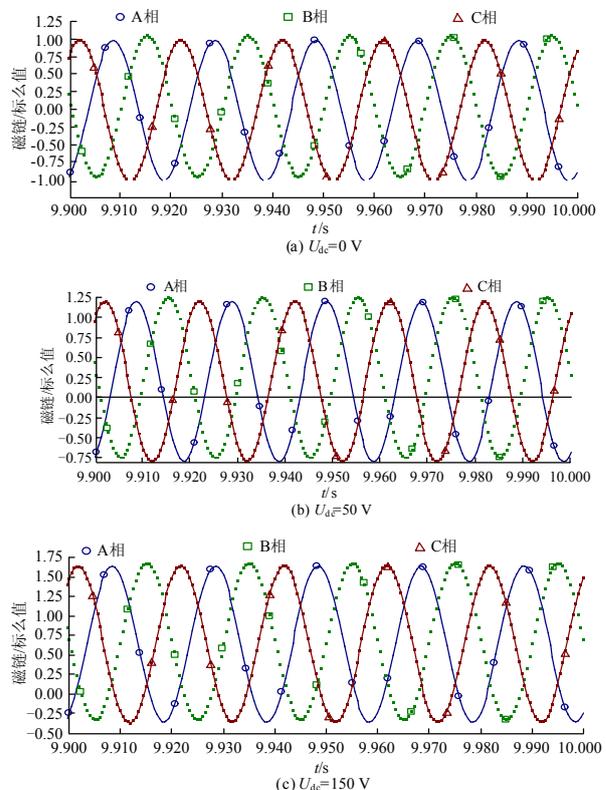


图 9 不同直流偏磁  $U_{dc}$  下磁链波形  
Fig.9 Flux linkage waveform under different DC bias

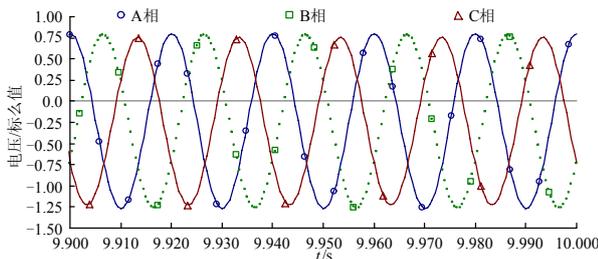


图 10 直流偏磁  $U_{dc}=150$  V 下三相五柱变压器  $Y_0$  侧电压波形  
Fig.10 Three-phase five-pole transformer voltage waveform of  $Y_0$  side under different DC bias

表 4 和表 5 分别为三相五柱式变压器 A 相和 B 相励磁电流及磁链与变压器中性点直流电压间的关系。

表 4 三相五柱式变压器 A 相电流及磁链  
与直流电压间的关系

Tab.4 The relation between A phase current magnetic linkage and DC bias of three-phase five pole transformer

直流 电压/V	直流 电流/A	电流		磁链	
		平均值/ A	有效值/ A	平均值/ p.u.	峰值/ p.u.
0.0	0.0	-0.182	7.665	-0.0197	0.969
20	2.06	-0.217	8.853	0.0312	1.025
50	5.15	-0.301	11.310	0.102	1.194
100	10.31	-10.958	15.356	-0.116	1.420
150	15.46	-25.7	35.048	0.148	1.635

表 5 三相五柱式变压器 B 相电流及磁链  
与直流电压间的关系

Tab.5 The relation between B phase current magnetic linkage and DC bias of three-phase five pole transformer

直流 电压/V	直流 电流/A	电流		磁链	
		平均值/ A	有效值/ A	平均值/ p.u.	峰值/ p.u.
0.0	0.0	0.069 9	12.527	0.073	1.03
20	2.06	3.556	15.231	0.084	1.120
50	5.15	9.24	19.755	0.126	1.256
100	10.31	11.243	23.658	0.156	1.460
150	15.46	13.8	31.222	0.215	1.675

三相五柱式变压器虽有磁回路,但一般铁心面积只有单相变压器的 39%<sup>[18]</sup>,故绕组中允许流过较大的直流电流。从图 8、9 和表 4 可见,当中性点直流电压从 0 增至 150 V 时, A、B 两相励磁电流的有效值分别为 35.048 A 和 31.222 A,与无直流时额定励磁电流相比只增大不到 5 倍,远小于三相组式

变压器中励磁电流的畸变。因此,三相五柱变压器励磁电流的畸变比三相组式变压器轻微,但比三相三柱变压器严重。

## 5 结论

(1) 三相组式变压器受直流偏磁影响最大,绕组中只允许流过较小的直流电流,因此对这类变压器需要特别注意增加限制直流偏磁的措施,如中性点串入电容器或者电阻器;

(2) 三相三柱式变压器由于铁心无通道,可允许通过较大的直流电流;

(3) 三相五柱式变压器受直流偏磁的影响介于前二者之间。

## 参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 黄莹, 徐政, 曾德文, 等. 西电东送纯直流输电方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 1-4.  
HUANG Ying, XU Zheng, ZENG De-wen, et al. Study on pure DC transmission scheme for future power transmission from west China to east China[J]. Power System Technology, 2004, 28 (19): 1-4.
- [3] 叶廷路. 葛南直流输电系统的运行与控制[J]. 电网技术, 1994, 18 (1): 20-25.  
YE Ting-lu. The operation and control of Ge-Nan HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 1994, 18 (1): 20-25.
- [4] 余建国, 晁剑, 钱海. 天广直流输电工程极 1 单极运行强迫停运故障原因分析和改进措施[J]. 电网技术, 2002, 26 (5): 80-83.  
YU Jian-guo, CHAO Jian, QIAN Hai. Analysis of forced outages of pole 1 in Tian-Guang HVDC transmission project under single pole operation and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2002, 26 (5): 80-83.
- [5] 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.  
SHANG Chun. Measure to decrease the neutral current of the AC transformer in HVDC ground return system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30 (4): 52-54.
- [6] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流偏磁对变压器的影响[J]. 中国电力, 2004, 37 (8): 41-43.  
KUAI Di-zheng, WAN Da, ZHOU Yun. Impacts of long-time DC biasing magnetism on transformers [J]. Electric Power, 2004, 37 (8): 41-43.
- [7] 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 Di-zheng, WAN Da, ZHOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (2): 81-82.
- [8] 钟连宏, 陆培均, 仇志成, 等. 直流接地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003, 29 (8): 12-13, 28.
- ZHONG Lian-hong, LU Pei-jun, QIU Zhi-cheng, et al. The influence of current of DC earthing electrode on directly grounded transformer[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (8): 12-13, 28.
- [9] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算[J]. 高电压技术, 2004, 30 (11): 48-49.
- MA Wei-min. DC biasing current in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 48-49.
- [10] 李晓萍, 文习山, 陈慈莹. 单相变压器直流偏磁励磁电流仿真分析[J]. 高电压技术, 2005, 31 (9): 8-10.
- LI Xiao-ping, WEN Xi-shan, CHEN Ci-ying. Simulating analysis of exciting current of single phase transformer on DC Bias[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 8-10.
- [11] 蒯狄正. 电网设备直流偏磁影响检测分析与抑制[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- KUAI Di-zheng. Inspection analysis and restraining of DC transmission on power grid equipment[D]. Nanjing: University of Science and Technology, 2005.
- [12] 张燕秉, 刘连光, 姚谦. 基于PSCAD/EMTDC的电网GIC影响仿真分析[J]. 华北电力技术, 2004(6): 10-13.
- ZHANG Yan-bing, LIU Lian-guang, YAO Qian. Simulation analysis on GIC effect on power grids based on PSCAD/EMTDC[J]. North China Electric Power, 2004 (6): 10-13.
- [13] 姚纓英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.
- YAO Ying-ying. Research on the DC bias phenomena of large power transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2000.
- [14] 郝治国, 余洋, 张保会, 等. 高压直流输电单极大地方式运行时地表电位分布规律[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (6): 10-14.
- HAO Zhi-guo, YU Yang, ZHANG Bao-hui, et al. Earth surface potential distribution of HVDC operation under monopole ground return mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (6): 10-14.
- [15] Tay Hock-Chuan, Swift G W. On the problem of transformer overheating due to geomagnetically induced currents[J]. IEEE transaction on PAS, 1985, 104 (1): 212-219.
- [16] Sakis Meliophonlos A P, Glytsis E S, Cokkinides G J. Comparison of SS-GIC and MHD-EMP-GIC effects on power systems[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9 (1): 194-207.
- [17] Albertson V D, et al. Load-flow studies in the presence of geomagnetically-induced currents[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 594-607.
- [18] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31 (9): 8-10.
- ZENG Lian-sheng. Impact of HVDC ground electrode current on the adjacent power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (9): 8-10.

收稿日期: 2009-12-14; 修回日期: 2010-01-21

作者简介:

余洋(1982-), 男, 硕士, 助教, 从事电力系统自动化、风力发电等方面研究; E-mail: ncepu\_yy@163.com

韦晨(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作;

朱林(1981-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护及现场安装调试维护工作。

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [18] HENDERSON P D, KLALAMN H, GINETTI J, et al. Cost aspects of AGC, inadvertent energy and time error[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1990, 5 (1): 111-118.

王娟娟(1978-), 女, 讲师, 博士研究生, 从事电力系统分析方面的教学工作, 研究领域为电力市场辅助服务; E-mail: wjj\_21257@sina.com

李卫东(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析方面的教学工作, 研究领域为互联电网运行控制性能评价标准、电力市场理论与应用、人工智能在电力系统中的应用等。

收稿日期: 2009-12-25; 修回日期: 2010-03-10

作者简介: