

线路同杆并架技术在直流输电系统中应用探讨

朱韬析¹, 王超²

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 浙江电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007)

摘要: 结合直流输电系统的特点, 根据线路同杆并架技术在实际应用中对传统保护造成的一些不良影响, 探讨了其应用在直流输电系统中时交直流保护系统应注意的问题。文中的分析和结论, 有助于提高采用线路同杆并架技术的交直流混联系统的运行可靠性。

关键词: 线路同杆并架; 直流输电; 保护系统

Discussion on the double circuit lines used in HVDC transmission system

ZHU Tao-xi¹, WANG Chao²

(1. CSG EHV Power Transmission Company, GZ Bureau, Guangzhou 510405, China;
2. Zhejiang Electric Power Dispatch and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In this paper, combined with the characteristics of HVDC transmission system, based on the negative influences caused by the double circuit lines on the traditional protections, the problems which should be paid attention to when the double circuit lines are used in HVDC transmission system are discussed. All the analysis and conclusions in this paper are valuable to improve the stability and reliability of AC/DC hybrid system.

Key words: double circuit lines; HVDC; protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0042-05

0 引言

直流输电具有传送功率大、线路造价低、控制性能好等优点, 是目前发达国家作为高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段^[1], 目前在我国得到了越来越广泛的应用。以南方电网为例, 目前已有天广、高肇和兴安直流输电系统投入运行, ± 800 kV 云广直流输电系统正在建设中, 而“十二五”期间, 还将新建溪洛渡右岸直流 ± 500 kV/2×3 200 MW、糯扎渡直流 ± 800 kV/5 000 MW 工程。

然而, 作为南方电网直流输电工程落点的广东地区, 线路所经区域经济发达、居民区密集、工业和旅游区域日渐成熟, 用地规划逐步趋于完善, 高压线路也较为密集, 土地资源十分紧张, 所以, 为了节约土地资源, 减少线路走廊, 并缓解线路走廊与地方用地之间的矛盾、降低与现有高压线路走廊的冲突, 设计时越来越多地采用了线路同杆设计的方案; 高压直流线路同杆并架的技术也正在研究中, 而在兴安直流输电工程, 已经采用了部分高压直流线路与接地极线路同杆架设的方法。

虽然, 同杆平行双回线由于具有出线走廊窄、

输送容量大、投资少、见效快、可提高供电可靠性、运行维护简单等优点, 可是, 同杆平行双回线运行方式复杂, 线路相互间的影响也更复杂, 给传统保护功能带来了一些新的问题。而应用在直流输电系统中时, 除了需要研究雷电性能、电磁环境线路间的相互影响等问题外, 还应考虑到直流输电系统传输功率大、对电网的影响也更大的特点, 对相应的保护功能进行重点研究, 谨防因同杆并架的接线方式引起保护误动、造成事故扩大, 导致不必要的紧急停运, 甚至危害设备或对电网造成不良影响。本文便是以南方电网直流输电工程为例, 结合各种同杆接线方式和实际的保护配置, 讨论了同杆平行双回线在直流输电系统中应用时应注意的一些问题。

1 直流线路同杆架设的应用状况和存在的问题

直流线路包括高压直流线路和接地极线路, 所以直流线路同杆架设技术包括高压直流线路同杆架设、接地极线路同杆架设或高压直流线路和接地极线路同杆架设。

目前, 国内暂无实际工程采用高压直流线路同

杆并架的技术, 该技术仍处于理论研究阶段^[2-5]; 而接地极线路由于双极平衡运行方式(也是最常见的运行方式)下, 流经接地极线路的电流几乎为零, 所以在实际工程中往往采用接地极线路同杆架设的方式, 根据运行经验, 这一接线方式并没有带来新的问题; 但是, 在兴安直流输电系统逆变侧采用的部分高压直流线路与接地极线路同杆架设技术, 在实际中却对系统运行造成一些不良影响。

1.1 运行实例简介

2007年6月投产的兴安直流输电工程(即贵广二回直流输电工程), 从贵州的兴仁换流站至广东深圳的宝安换流站, 高压直流线路全长约1210 km; 逆变侧接地极线路从深圳宝安换流站至清新县飞来峡鱼龙岭村附近的接地极, 全场188.881 km。由于受地方规划要求和线路走廊的限制, 从清远佛冈#2080塔至宝安换流站共计183.193 km的高压直流线路与接地极线路同杆架设, 仅有#2080塔至接地极、长5.688 km的线路单独架设。

2008年5月5日和7月30日, 兴安直流输电工程发生了两起双极相继闭锁的故障, 对整个交直流电网均造成较大的冲击。故障过程均为极1线路保护动作, 重启动^[6]不成功后闭锁极1; 紧接着, 极2接地极线路电流不平衡保护^[7]动作, 闭锁极2。2008年7月30日兴安直流输电工程双极相继闭锁的故障录波如图1所示。

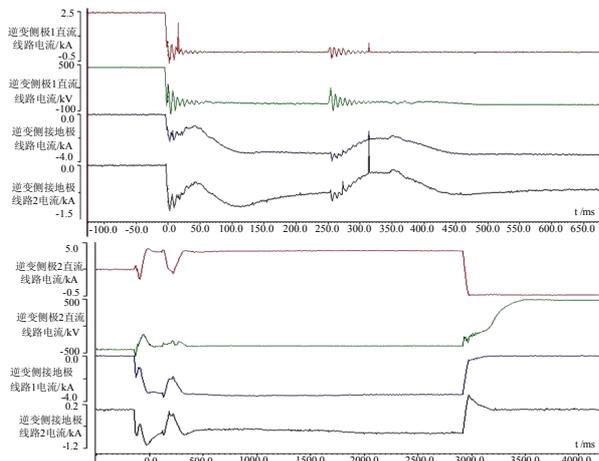


图1 暂态故障录波

Fig.1 Transient fault recorder curves

根据相关信号和录波图分析如下: 首先极1线路发生了故障, 随即启动了线路故障再启动功能; 与此同时, 接地极线路1也发生了故障, 导致接地极线路1、2出现较大的不平衡电流; 接着, 极1线路经去游离时间后, 故障仍然存在, 重启不成功, 于是闭锁极1, 极2转为单极大地运行方式, 直流电流将完全

通过接地极线路流入大地; 此时接地极线路1存在的故障造成流经接地极线路1的电流接近4000 A, 而流经即接地极线路2的电流仅约1000 A, 二者差值远远超过了接地极线路电流不平衡保护的门槛值, 所以, 经2.5 s的保护动作延时后, 极2停运。

随后巡线发现逆变侧同杆线路双回段有多处雷击痕迹。而2008年5月5日的故障过程和原因基本类似。

事故发生后, 运行维护单位组织对高压直流线路与接地极线路同杆架设时的雷击机理进行了深入研究, 为了避免再次发生类似故障, 还探讨了多种改进措施, 如增加线路故障时的重启次数或延长重启的去游离时间、改进单极大地方式下接地极线路不平衡保护动作延时和动作后果、接地极线沿线加装避雷器、增加导线空间距离或改变接地极线位置、两接地极线沿线加装短路横担、接地极线适当换位甚至移出接地极线另设接地极线路走廊等。然而, 综合考虑电网对线路重启造成的不良冲击的承受能力、一次设备改造的工期及造价等因素后, 目前仅调整了重启动功能和接地极线路不平衡保护动作的延时: 2008年6月6日, 将线路故障重启动功能设为0.8倍额定电压下启动1次, 去游离时间由200 ms调整为350 ms; 单极大地回线方式下接地极线路不平衡保护的動作延时由500 ms调整为2.5 ms。但根据这之后的07月30日的故障实例, 说明这次改进并不能从根本上避免上述问题。

1.2 结论

如上述实例所述, 采用高压直流线路与接地极线路同杆架设技术, 当高压线路遭受雷击时, 与之接近的接地极线路更易感应出较高的过电压; 双极运行方式下, 如果高压线路故障后启动重启动仍无法消除故障并闭锁相应极, 接地极线路的故障很可能造成另一极相继闭锁。为了避免另一极完全没有必要的停运, 需要对控制保护功能进行相应改进, 如将单极大地方式下接地极线路不平衡保护动作后果改进为启动线路故障重启动, 可这又可能给电网稳定带来新的问题。

因此, 未来直流输电工程如果要采用高压直流线路与接地极线路同杆架设技术, 必须针对上述问题, 对一次设备的防雷功能及控制保护的相关功能开展深入研究并采取有效措施, 以避免单条线路故障却造成双极停运的事故。

2 直流输电系统应用交流线路同杆架设时应注意的问题

目前, 同杆并架技术在交流输电中得到了较多

应用^[8]，然而，由于同杆平行双回线运行方式复杂、存在线间互感及跨线故障，所以在单回线上广泛应用的零序电流保护、距离保护等往往难以满足同杆平行双回线的要求。如：应用于单回线的距离保护应用在同杆平行双回线路上时，当线路末端发生非同名相单相跨线故障时会同时三相切除双回线；当发生接地故障时，由于受零序互感的影响，双回线的接地距离保护的测量阻抗会产生较大的误差，造成保护误动或拒动^[9]；平行双回线中一回线路出现内部故障，由于两侧开关切除不同时，在切除故障期间非故障线路可能出现功率倒向现象，此时，纵联保护往往因为闭锁信号或者允许信号在时间配合上出现问题而导致保护误动^[10]。对于这些问题，国内保护工作者已经进行了较深入的研究，并提出一些有效的改进措施^[11-24]，不过，根据目前电力系统中的运行实际情况，上述问题仍时有发生，并未得到根本性的解决。

直流输电系统的交流线路也往往采用了同杆并架技术，如高肇直流逆变侧仅有的两条交流线路肇砚甲乙线、兴安直流逆变侧的安象甲乙线等等均采用了同杆并架技术。而对于逆变站，如果在无短路故障条件下失去最后一条交流线路，造成无交流甩负荷，则称之为最后断路器跳闸。最后断路器跳闸^[25]是直流输电系统的特有故障之一，最后断路器跳闸后，由于逆变站换流母线上连接的大量无功补偿设备不能立即切除，直流系统继续向其充电，因此会引起严重的暂时过电压^[26]；另外，甩负荷时的暂时过电压会使换流变压器饱和，在不利条件下亦可能产生谐振^[27-28]；对此，直流输电系统中也设置了相应的保护功能，一旦检测到最后断路器跳闸，将立即启动双极紧急停运，无疑，这又会对电网造成巨大的冲击。因此，在直流输电系统的运行中，应尽量避免发生最后断路器跳闸事故。

显然，直流输电系统逆变侧交流出线采用同杆并架技术时，必须综合考虑直流输电系统的特殊性，完善采用的线路保护功能，尽量避免单回交流出线故障时造成另一回交流出线保护误动；同时，还要对交流出线的跨线故障也应重点研究，以免因启动最后断路器跳闸功能而对直流输电系统甚至整个电网造成重大不良影响。

3 交直流线路同杆架设时应注意的问题

目前，国内外暂无对交直流线路同杆架设技术的研究。然而，随着电力系统的发展和土地资源的紧缺，交直流线路间的距离可能会越来越近，因此，不仅要逐步开展研究交直流线路近距离运行时的相

互影响，还应考虑在相应的交直流系统中设置监测相关故障的保护功能。

如果交直流线路发生碰线或感应故障，造成交流流量串入直流输电系统，不仅可能使换流阀因出现断续电流而产生很高的过负荷，还可能对换流变、平波电抗器、避雷器、直流滤波器等设备造成危害；而根据交流和直流谐波的变换关系，直流侧 50 Hz 电流将转换为交流侧的直流谐波和 2 次谐波电流，这又将对交流设备造成危害。南方电网的各直流输电工程中，其保护系统中均设置了监测交直流线路碰线故障的保护：如果检测到直流线路电流和电压中 50 Hz 谐波的幅值大于门槛值，将立即启动相应极紧急停运。

不过，目前国内的各交流保护暂未对交直流线路碰线故障做专门的研究，现有保护功能能否快速准确地检测这一故障还有待进一步验证。而交直流线路发生碰线或感应故障时，将对交流系统的设备产生更严重的危害，尤其是主变：直流电流流入变压器，产生的直流磁通致使换流变压器出现直流偏磁，带来加剧铁心饱和、励磁电流显著增大及波形严重畸变等一系列问题，严重时甚至可能引起变压器损坏^[29-32]。此外，万一直流系统交直流碰线保护拒动，交流相应保护动作后却又启动了重合闸，这可能会再次对设备造成危害。

因此，对于交直流混联运行系统，尤其是直流输电系统落点密集的区域，如广东、上海等地，有必要对交流线路保护在交直流线路碰线故障下的响应特性进行研究和完善，考虑在相关交流保护系统中设置专门的保护功能，并与直流系统相应保护妥善配合，以确保一次设备的安全和电网的稳定。

4 结语

近年来，直流输电以及线路同杆并架技术在我国均得到了越来越广泛的应用。本文探讨了直流输电系统采用线路同杆并架技术时，提高运行可靠性的一些问题：

(1) 直流输电线路采用同杆并架技术时，无论是高压直流线路同杆并架或是高压直流线路和接地极线路同杆并架，均应对一次设备的防雷功能及控制保护的相关功能，基于整个电网的稳定，开展深入研究并采取有效措施，以免发生单条线路故障却造成双极停运的事故；

(2) 逆变侧交流出线采用同杆并架技术时，考虑到直流输电系统最后断路器跳闸时产生的过电压对站内设备的危害及启动的双极紧急停运对整个电网的巨大冲击，应完善采用的线路保护功能，尽量

避免同杆并架的直流输电系统多回交流出线被同时切除;

(3)虽然目前国内外暂未实施交直流线路同杆架设技术,但仍不应忽略研究交直流线路碰线故障,尤其是直流输电系统落点密集的地区,如广东、上海。建议加强研究交直流线路相应保护功能及其配合等问题,考虑在相应交流保护系统中设置专门的保护功能并妥善配合,以防止交直流线路碰线故障危害一次设备的安全、甚至破坏电网的稳定。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 石岩, 王庆, 聂定珍, 等. $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程同杆并架技术的综合研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (21): 1-6.
SHI Yan, WANG Qing, NIE Ding-zhen, et al. Comprehensive Study on Technology of Two Bipole Lines on the Same Tower for $\pm 500\text{kV}$ HVDC Project[J]. Power System Technology, 2006, 30 (21): 1-6.
- [3] 张民, 石岩. 同杆并架 $\pm 500\text{kV}$ 直流系统间相互影响的实时仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31 (1): 44-49.
ZHANG Min, SHI Yan. Real-Time Digital Simulation Analysis on Interaction Between Two $\pm 500\text{kV}$ HVDC Systems Erected on the Same Tower[J]. Power System Technology, 2007, 31 (1): 44-49.
- [4] 聂定珍, 周沛洪, 戴敏, 等. $\pm 500\text{kV}$ 同杆双回直流线路雷电性能的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 148-151.
NIE Ding-zhen, ZHOU Pei-hong, DAI Min, et al. Study on Lightning Performance for $\pm 500\text{kV}$ DC Double Circuit Transmission Lines[J]. High-voltage Engineering, 2007, 33 (1): 148-151.
- [5] 周静, 马为民, 石岩, 等. 葛南同杆并架直流工程可靠性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 152-155.
ZHOU Jing, MA Wei-min, SHI Yan, et al. Study of Reliability for the Double Circuits on the Same Tower of Ge-Nan DC Project[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (1): 152-155.
- [6] 王海军, 吕鹏飞, 曾南超, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启功能研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (23): 32-35.
WANG Hai-jun, Lü Peng-fei, ZENG Nan-chao, et al. Research on DC Line Fault Recovery Sequence of Guizhou-Guangdong HVDC Project[J]. Power System Technology, 2006, 30 (23): 32-35.
- [7] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 接地极线路不平衡保护的相关问题研究[A]. 2007 第十一届全国保护和控制学术研讨会[C]. 2007.
YU Jiang, ZHOU Hong-yang, HUANG Jia-yin, et al. Issues of Electrode Line Unbalance Protection[A]. in: 11th National Protection and Control Symposium[C]. 2007.
- [8] 舒印彪, 赵丞华. 研究实施中的 500kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电网技术, 2002, 26 (4): 49-52.
SHU Yin-biao, ZHAO Cheng-hua. Study and Implementation of 500kV Compact Power Transmission Line with Double Circuits on the Same Tower in China[J]. Power System Technology, 2002, 26 (4): 49-52.
- [9] 康小宁, 梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述[J]. 继电器, 2004, 32 (23): 72-76.
KANG Xiao-ning, LIANG Zhen-feng. Survey on the Protective Relaying and Autoreclosure for Double-circuit Lines on the Same Pole[J]. Relay, 2004, 32 (23): 72-76.
- [10] 陈久林, 陈建民, 张量, 等. 功率倒向对平行双回线纵联保护的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (2): 105-108.
CHEN Jiu-lin, CHEN Jian-min, ZHANG Liang, et al. Analysis on the Influence of the Power Converse to the Double-circuit Transmission Lines Pilot Protective Relaying and Its Corresponding Mesasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (2): 105-108.
- [11] 葛耀中, 陶惠良, 索南加乐. 同杆双回线的故障特点和继电保护问题[J]. 电力自动化设备, 1989, 9 (2): 8-17.
GE Yao-zhong, TAO Hui-liang, SUONAN Jia-le. Protective Relay and Fault Characteristic of Double Circuit Lines on Same Tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 1989, 9 (2): 8-17.
- [12] 钱鑫, 谢鹏, 李琥, 等. 故障类型及换位方式对同杆双回线回路间耦合影响的研究[J]. 电网技术, 2002, 26 (10): 18-20.
QIAN Xin, XIE Peng, LI Hu, et al. Influence of Fault Types and Different Transposition Forms on Coupling Between Two Circuit on Same Tower[J]. Power System Technology, 2002, 26 (10): 18-20.
- [13] 张华贵. 220~500 kV 同杆双回继电保护及重合闸[J]. 继电器, 1996, 24 (2): 17-20.
ZHANG Hua-gui. Relay Protection and Reclosure for 220 ~ 500kV Double2circuit Lines on One Pole[J]. Relay, 1996, 24 (2): 17-20.
- [14] 赵希正, 等. 220 kV 同杆并架线的保护方式问题[J]. 继电器, 1988, 16 (2): 19-27.
ZHAO Xi-zheng, et al. Protective Scheme of Double Circuit Lines on Same Tower[J]. Relay, 1988, 16 (2): 19-27.
- [15] 李一泉, 焦邵麟, 张弛, 等. 平行线路纵联零序方向保护安全性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (6): 104-107.
LI Yi-quan, JIAO Shao-lin, ZHANG Chi, et al. Safety Analysis on Pilot Zero Sequence Direction Relay Applied in Parallel Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (6): 104-107.
- [16] 吴永刚, 思晓兰, 张惠芳. 330 kV 同杆并架双回线继

- 电保护优化配置及应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (7): 64-66.
WU Yong-gang, SI Xiao-lan, ZHANG Hui-fang. Optimizing Protection Configuration of 330 kV Double Transmission Line on Same Tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (7): 64-66.
- [17] 李钢, 路洁, 白晶, 等. 一起平行运行线路纵联零序方向保护误动分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14): 104-107.
- [18] 李夏阳, 罗建, 张太升. 横差保护在 500 kV 同杆并架双回线中的应用研究与仿真实验[J]. 继电器, 2008, 36 (9): 1-4.
LI Xia-yang, LUO Jian, ZHANG Tai-sheng. Study and Simulation Experiment of Transverse Differential Protection for 500 kV Double Circuit Lines on the Same Tower[J]. Relay, 2008, 36 (9): 1-4.
- [19] 薛士敏, 贺家李, 李永丽. 利用同序负序分量的同杆双回线快速保护[J]. 天津大学学报, 2008, 41 (8): 926-930.
XUE Shi-min, HE Jia-li, LI Yong-li. Fast Protection of Parallel Transmission Lines on the Same Tower with Same Directional Negative Sequence Components[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41 (8): 926-930.
- [20] 张武军, 何奔腾, 洪光辉, 等. 同杆并架双回路行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 66-77.
ZHANG Wu-jun, HE Ben-teng, HONG Guang-hui, et al. Traveling-wave Differential Relay Scheme for Double-circuit Parallel Lines on the Same Pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (17): 66-77.
- [21] 郑玉平, 黄震, 张哲, 等. 同杆并架双回线自适应重合闸的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 58-62.
ZHENG Yu-ping, HUANG Zhen, ZHANG Zhe, et al. Study on Self-adaptive Auto-reclosing for parallel Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (22): 58-62.
- [22] 张太升, 鄢安河, 赵一, 等. 同杆双回线的新型继电保护方案研究[J]. 继电器, 2008, 36 (8): 16-19.
ZHANG Tai-sheng, YAN An-he, ZHAO Yi, et al. Study of a New Relay Protection Scheme for Double-circuit Lines on the Same Pole[J]. Relay, 2008, 36 (8): 16-19.
- [23] 曾耿晖, 黄明辉, 刘之尧, 等. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (20): 103-107.
- [24] 刘天斌, 张月品. 同塔并架线路接地距离保护零序电流补偿系数整定[J]. 电力系统自动化, 2006, 32 (10): 101-103.
- [25] 王华伟, 蒋卫平, 吴娅妮, 等. 云广±800 kV 特高压直流工程逆变站最后断路器跳闸故障研究[J]. 电网技术, 2006, 32 (18): 6-9.
WANG Hua-wei, JIANG Wei-ping, WU Ya-ni, et al. Study on Last Break Trip Fault of Inverter Station in ±800kV UHVDC Project from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2006, 32 (18): 6-9.
- [26] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 218-219.
- [27] DL/T 605-1996, 高压直流换流站绝缘配合导则[M]. 北京: 中国电力出版社.
- [28] 张静, 徐政, 王锋. 包含 VDCCOL 的 VSC-HVDC 改进控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (22): 41-44.
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng. An Improved Control Strategy for VSC-HVDC Using VDCCOL[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (22): 41-44.
- [29] 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.
ZHAO Jie, LI Xiao-lin, Lü Jin-zhuang, et al. Applying Series Resistor to Restrain Power Transformer DC Biasing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (12): 88-91.
- [30] 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, ZOU Yun. Analysis and Handling of Impact of Geomagnetically Induced Current Upon Electric Network Equipment in DC Transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (2): 81-82.
- [31] 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.
HUANGFU Cheng, RUAN Jiang-jun, ZHANG Yu, et al. DC Magnetic Bias Induced Current Effects on Transformer and Restricting Methods[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (9): 117-120.
- [32] 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): 12-14.
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): 12-14.

收稿日期: 2009-01-21

作者简介:

朱韬析 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

王超 (1981-), 男, 博士, 主要从事电力系统可靠性、电网安全稳定运行、特高压输电等方面的研究。