

GIC 引发直流偏磁对距离保护III段动作性能影响的分析

郑涛¹, 卢婷¹, 杨国生², 刘连光¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 详细论述了直流系统单极运行及磁暴引发的变压器直流偏磁的异同点, 进而探讨了地磁感应电流(GIC)的等效源建模问题。通过 PSCAD/EMTDC 平台搭建了计及变压器偏磁效应的双机系统仿真模型, 对线路事故过负荷进行了仿真研究, 分析评估线路距离保护耐受 GIC 的能力。仿真结果表明 GIC 通过中性点接地变压器侵入电力系统后, 可能造成变压器铁心不对称饱和, 从而使测量阻抗发生周期性波动。距离保护 III 段作为下级变压器的远后备保护, 在线路事故过负荷造成负荷转移的情况下, 其动作可靠性降低, 可能受 GIC 扰动而发生误动。

关键词: 地磁感应电流; 直流偏磁; 距离保护; 事故过负荷; 测量阻抗

Analysis of the effects on distance protection zone III relays caused by DC bias induced from geomagnetic induced current

ZHENG Tao¹, LU Ting¹, YANG Guosheng², LIU Lianguang¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper describes the similarities and differences between the DC bias' influences on transformers made by geomagnetic induced current (GIC) and HVDC in detail. Then the simulation of GIC is discussed and a simulation system is built based on PSCAD / EMTDC platform. Then the case of post-fault over load is simulated and the performance of distance protection is analyzed. The result demonstrates that when GIC invades power systems through transformers with neutral grounded the transformer core may become asymmetric saturated, which may cause the measured impedance in the state of cyclical fluctuations and distance protection zone III which backs up for adjacent transformer is possible to mal-operate under the case of post-fault over load.

Key words: geomagnetic induced current (GIC); DC bias; distance protection; post-fault over load; measured impedance

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0001-05

0 引言

自 2012 年以来,地球已经进入并正处于新一轮的太阳活动高发期。由磁暴引发的地磁感应电流(GIC)对电网的安全稳定运行存在着潜在威胁,近年来国内外电网数次遭受的 GIC(Geomagnetic Induced Current)侵害事件使得磁暴对电网的影响逐渐引起了专家学者的关注。例如,在北欧、北美等磁纬度较高的地区,磁暴对电网的影响逐渐引起了专家学者的关注。例如,在北欧、北美等磁纬度较高的地区,地磁场波动相对剧烈,GIC 曾导致电网多次跳闸,甚至大规模停电事故。随着电网规模的不断扩大,一些中低纬度地区也多次出现了 GIC 危害电网的事件,据报道南非有 15 台变压器受 GIC 影响导致永久损坏,在巴西、日本的电网中也曾测量到较

大幅值的 GIC^[1-2]。我国广东、江苏和浙江等沿海地区电网中也相继发生了一些 GIC 侵害电网事件,造成了变压器温升异常,振动和噪声增大等现象^[3-4]。

地磁感应电流(GIC)经由变压器接地中性点馈入电网后将可能在电力变压器中引发“直流偏磁”现象。当高压直流输电(HVDC)运行于单极-大地回路方式或双极不平衡运行方式时也可能导致直流偏磁^[5]。GIC 的变化情况与全球性地磁场扰动息息相关,其偏磁电流的频率、幅值和方向的变化规律皆由其决定,其幅值通常在数十安至上百安不等,对电网具有全局影响力,与 HVDC(High Voltage Direct Current)引发的恒定偏磁电流有着显著差别。然而,目前的研究一般对两者视作等同不作区分;且研究一般仅涉及对变压器本体及电流互感器的影响^[6-8]上,其对相关输电线路保护的影响也大多是从抑制

装置接入的角度^[9-10]进行考虑的, GIC 本身引起的直流偏磁对线路距离保护的影响研究甚少。

我国幅员辽阔, 南北跨度大, 地形地貌复杂, 电网遭受 GIC 危害的概率将会更大, 特别是较高纬度地区的电网受 GIC 影响将会更为严重。近年来, 国家大力发展超/特高压输电工程, 超/特高压电网由于其输电线单位长度电阻较小, 输电距离长, 输送功率大, 如输电线路保护发生误动或拒动, 将对整个电网的安全稳定运行带来极大的威胁。因此研究超/特高压输电线路保护受地磁感应电流影响时保护适应性具有重要的工程实际意义。

1 GIC 引发直流偏磁的机理

1.1 GIC 的形成与流通过程

灾害性空间天气(俗称“太阳风暴”)会引起全球性的地磁场强烈变化, 由电磁感应定律可知, 时变的磁场将会在地球表面感应出电场, 从而造成地表电位不均等, 并因大地地质土壤的电导形成地电流。当其所在区域内存在中性点接地电力系统时, 地电流就会在中性点接地变压器、地上输电线路和大地构成的回路中流通, 形成地磁感应电流(GIC), 如图 1。

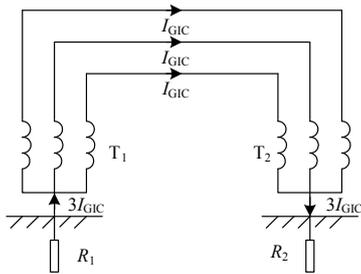


图 1 GIC 的流通过程
Fig. 1 Flow path of GIC

1.2 GIC 与 HVDC 引发的直流偏磁比较

GIC 和 HVDC 均是由于接地点附近地表电位不等而在电网中感应形成的偏磁电流, 但两者在形成机理和表面特征上差异明显。就 HVDC 所引发的直流偏磁而言, 该偏磁电流是由极址土壤中形成的一个恒定不变的直流电流场所驱动, 仅会对直流感地极附近的电力系统产生一定的影响, 当系统运行方式不变时, 偏磁电流的幅值保持恒定且属于纯粹的直流电流, 其幅值一般水平在几安到十几安之间, 其影响有限。

与高压直流输电不同, 磁暴对于电网的影响是全局性的。通过对 GIC 的实际监测数据分析可知, 如图 2, GIC 的幅值波动剧烈, 含有大量谐波与随

机分量。GIC 具有高幅值、长周期、随机性、时变等特点。GIC 属低频交流, 其频率通常在 0.001~0.1 Hz 之间, 其幅值一般可以达到几十安。根据已掌握部分国内外的 GIC 监测数据广东岭澳核电站 2004 年监测数据显示当地曾出现过高达 75.5 A 的地磁感应电流, 加拿大魁北克电网更是监测到上百安的地磁感应电流^[11]。另外, GIC 会对中性点接地电网造成影响, 但不限于接地电网, 因其特殊的低频交流性质, 有可能通过变压器绕组的耦合变到不接地系统侧, 扩大其影响范围。

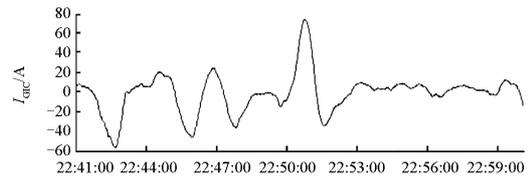


图 2 GIC 局部波形图
Fig. 2 Partial waveforms of GIC

GIC 所引起的偏磁电流不仅在幅度上已远大于 HVDC 所引起的偏磁电流, 并且因其影响范围广, 不确定性强, 变化规律复杂等特点, GIC 的潜在威胁性远大于 HVDC, 因此有必要引起足够重视, 将 GIC 与 HVDC 引发的直流偏磁进行区别, 针对 GIC 进行独立深入的研究。

2 GIC 对线路距离保护的影响分析

对于距离保护 I 段、II 段, 由于距离保护动作特性通常采用圆或四边形特性, 其动作边界留有足够余度, 受 GIC 影响一般较小。而距离 III 段作为后备保护, 其动作特性一般需要与相邻元件的后备保护相配合。特别是对线路-变压器连接方式, 具有低频交流性质的 GIC 经变压器中性点馈入电网后可能造成变压器发生周期性的不对称饱和, 从而可能使测量阻抗发生周期性波动, 呈现出系统低频振荡的特征。随着愈渐复杂的电网拓扑结构和日益多变的电网运行方式(如双回线路、多回线路的并列运行), 距离保护 III 段的可靠性面临着更加严峻的挑战。在由磁暴诱发 GIC 侵害电网的大环境影响下, 当一个输电断面有多回线路, 且其中的一回或几回线路因为某种故障原因跳闸, 负荷转移造成运行线路潮流增加, 距离保护 III 段阻抗元件, 是否依然能够正确识别是继保从业者必须考虑的问题。

综上, 下一部分本文将结合网络拓扑及元件模型^[12-14], 构建计及 GIC 效应的电网一次系统仿真模型, 分析距离保护 III 段阻抗元件的动作特性, 研究 GIC 对输电线路距离保护 III 段产生的影响, 评估不

同强度 GIC 作用下距离保护Ⅲ段的耐受性。

3 仿真研究

根据上述 GIC 产生的直流偏磁及其对距离保护影响机理的分析,为考核在事故过负荷情况下线路距离保护Ⅲ段受由 GIC 引发的偏磁危害影响的保护动作性能,建立图 3 所示 PSCAD/EMTDC 仿真模型。根据 GIC 的频率范围(0.001~0.1 Hz),采用低频正弦量来模拟 GIC。

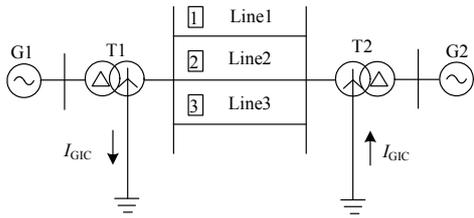


图 3 系统模型示意图

Fig. 3 Layout of simulation system

该模型为三回线路并列运行的双端系统等值模型,正常情况下,发电机组 G1 通过变压器 T1 变换,经过三回线路 Line1、Line2、Line3 与变压器 T2、发电机组 G2 实现功率传输。系统参数如下:

发电机组 G1、G2,容量为 2 000 MVA,电压等级 1 000 kV;变压器 T1、T1 为 Y-Δ 接线方式,额定容量 1 000 MVA,额定变比 1 000/500 kV,短路阻抗 X_k 为 0.2 p.u.; Line1、Line2、Line3 线路参数均相同,长度为 150 km,线路正序阻抗 Z_1 为 $43.36 \angle 84.9^\circ$,零序阻抗 Z_0 为 $132.9 \angle 78.3^\circ$ 。

3.1 整定计算

此处 Line 1 保护 1 距离Ⅲ段设定作为相邻下级变压器 T2 的远后备保护。以接地距离继电器阻抗保护为例进行说明,按照距离Ⅲ段整定原则,Line1 保护 1 Ⅲ段应与相邻下级变压器快速(速动)保护相配合^[15]。

$$Z_{\text{set.Ⅲ}} = K_{\text{rel.Ⅲ}} (Z_1 + K_{\text{b.min}} Z_t) \quad (1)$$

对于变压器 T2 线路侧,其等值正序阻抗为 100 Ω。考虑三回线路的助增作用,保护 1 的Ⅲ段动作阻抗为 291.86 Ω。采用方向阻抗继电器,因线路正序阻抗角为 84.9° ,继电器最灵敏角设定为 85° 。

3.2 过负荷仿真结果与分析

系统正常运行状态时如图 2,发电机—变压器组经三回线路 Line1、Line2 和 Line3 向系统输送功率,设为状态 1,如图 4 中标注。

在 t_1 时刻,线路 Line3 近变压器母线 T1 一侧开关因为某种原因跳开,潮流向线路 Line1 和 Line2 转移,设为状态 2,如图 4 中标注。

在 t_2 时刻,线路 Line2 变压器母线 T1 一侧开关又由于某种原因跳开,此时潮流继续向线路 Line1 转移,设为状态 3,如图 4 中标注。

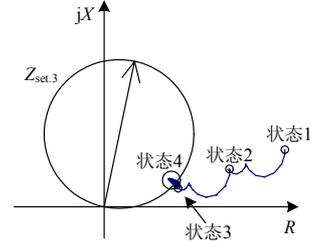


图 4 事故过负荷测量阻抗轨迹

Fig. 4 Trajectory of measured impedance during post-fault over load

保护装置 1 在各状态下的电气量如表 1 所示。

表 1 保护装置 1 在系统各状态下的电气量

Table 1 Parameters of simulation system

状态	U_m/kV	I_m/kA	Z_m/Ω
状态 1	$517.04 \angle -132.60^\circ$	$1.07 \angle -152.32^\circ$	$494.0 \angle 19.72^\circ$
状态 2	$513.87 \angle -132.86^\circ$	$1.544 \angle -152.28^\circ$	$334.0 \angle 19.42^\circ$
状态 3	$511.46 \angle -133.59^\circ$	$2.940 \angle -152.18^\circ$	$174.0 \angle 18.61^\circ$

t_2 时刻之后,保护 1 处负荷阻抗测量值在 GIC 的持续作用下出现波动,其呈现在阻抗平面的坐标点在状态 3 处发生偏移,将该偏移过程定义为状态 4,如图 4 中标注。

3.3 GIC 作用过程分析

图 5~图 7 分别表示在 GIC 作用的前半周期励磁电流、测量阻抗幅值和相角的变化过程。在 GIC 的前 1/4 周期中,变压器受到正向的偏磁作用,随着偏置磁通的不断累积,励磁特性曲线工作点逐渐由线性区上移至向正向饱和区,此时变压器励磁电流呈现明显的不对称饱和特征,变压器对外等值阻抗发生变化,线路保护处测量阻抗由此产生波动。测量阻抗幅值随着饱和程度的加深逐渐减小,测量阻抗角也呈现微弱的增大趋势,在 GIC 正弦模拟量到达正向峰值后由于磁滞效应,测量阻抗继续减小至最小值而后回增,测量阻抗角继续增大至最大值而后开始减小。在 GIC 的第二个 1/4 周期中,由于正向偏磁电流的衰减,变压器逐渐由饱和区退回工作点,励磁电流饱和特征逐渐消失,测量阻抗幅值和相角回归至状态 3。当进入 GIC 的第三和第四个 1/4 周期时,变压器受到反向偏磁作用,同样经历一个反向增磁和退磁的过程,测量阻抗幅值随之再次减小而后回增,测量阻抗角亦增大而后回缩,测量阻抗的波动过程与前 1/2 周期相同。

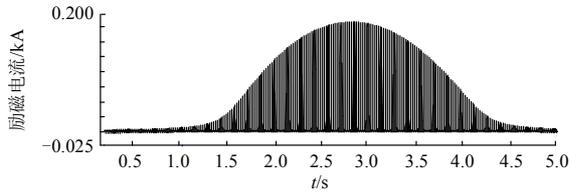


图 5 励磁电流变化情况
Fig. 5 Magnetic current

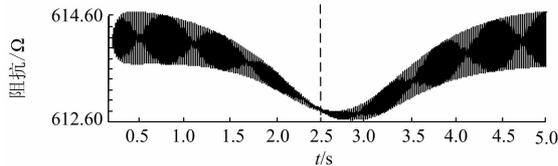


图 6 测量阻抗幅值变化情况
Fig. 6 Amplitude of measured impedance

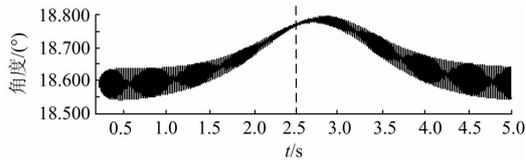


图 7 测量阻抗角变化情况
Fig. 7 Phase angle of measured impedance

因此，状态 4 可分解为两个交替循环出现的过程，即进入动作圆和退出动作圆的过程，图 8 显示了其在阻抗平面的波动过程。

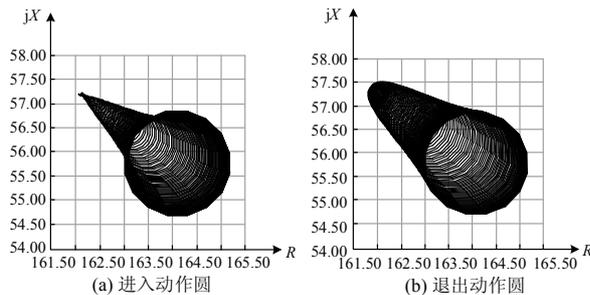


图 8 进入与退出动作圆的过程

Fig. 8 Process of entering and quitting relay operating zone

由 GIC 引起的测量阻抗波动周期由 GIC 的时间尺度决定，仿真中，以 GIC 模拟量的半个正弦波为一个波动周期，测量阻抗轨迹分别进入和退出保护动作区各一次，鉴于 GIC 的频率范围在 0.001~0.1 Hz 之间，GIC 型测量阻抗波动周期一般为几秒到数十秒，甚至上百秒。因此测量阻抗落入动作区的时间在绝大多数情况下远大于系统发生振荡时的振荡周期，距离保护装置故障判别元件识别为故障，阻抗元件动作，造成线路 Line1 误切除，两侧电网间的联络线全部断开，可能引发一系列危害。

因此电力系统受到 GIC 扰动时，其线路保护动作性能受到影响，尤其在发生事故过负荷的情况下，

高幅值 GIC 的持续作用可能使得距离 III 段远后备保护装置启动并开放，传统保护判据误识别，最终导致保护误动。综上，距离保护 III 段受 GIC 影响，其动作可靠性大大降低，需增加限制条件^[16-17]，引进辅助判据，对阻抗特性进行修正。针对距离保护 III 段远后备应对 GIC 的防误动措施，有必要进行深入研究。

4 结论

本文采用低频正弦量对 GIC 进行模拟，研究了其引发的变压器直流偏磁现象对线路距离保护的影响。重要结论如下：

- (1) GIC 引起的直流偏磁可能导致变压器铁心周期性不对称饱和，从而可能使测量阻抗发生周期性波动。
- (2) 在线路事故过负荷的情况下，GIC 可能造成距离保护 III 段远后备误动，防误动策略有待进一步探究。

重视并研究 GIC 问题尤其是 GIC 相关电网保护问题是必要和紧迫的，本文研究的意义亦在此。

参考文献

- [1] KAPPENMAN J G Geomagnetic storms and their impact on power systems[J]. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(5): 5-8.
- [2] WIK M, VILJANEN A, PIRJOLA R, et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in Southern Sweden[J]. Space Weather, 2008, 6(7): 11-16.
- [3] 刘连光, 刘春明, 张冰. 磁暴对我国特高压电网的影响研究[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 1-5.
LIU Lianguang, LIU Chunming, ZHANG Bing. Effects of geomagnetic on UHV power grid in China[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 1-5.
- [4] LIU Chunming, LIU Lianguang, PIRJOLA R, et al. Calculation of GIC in mid-low latitude power grids based on the plane wave method: a preliminary case study[J]. Space Weather, 2009: 7-11.
- [5] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 56-59.
HAN Minxiao, WEN Jun, XU Yonghai. HVDC transmission principle and operation[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 56-59.
- [6] GAUNT C T, COETZEE G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk[C] // Power Tech, IEEE Lausanne, 2007: 807-812.
- [7] 郑涛, 陈佩璐. 直流偏磁下的 CT 饱和对变压器差动保

- 护的影响研究[C] // 中国电机工程学会继电保护专业委员会, 第十三届全国保护和控制学术研讨会论文集, 2011: 91-95.
- ZHENG Tao, CHEN Peilu. The effects on transformer differential protection caused by CT saturation with DC bias[C] // CSEE Relay Protection Special Committee, Proceedings of the 13th Chinese Conference on Power System Protection and Control, 2011: 91-95.
- [8] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁和剩磁同时作用下保护用电流互感器的暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 107-111.
- LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Research on the transient characteristics of the protective CTS with co-impacts of DC bias and remnant flux[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 107-111.
- [9] 郑涛, 朱先启, 韩东伟, 等. 直流偏磁抑制装置接入对线路距离保护的影响分析[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 545-550.
- ZHENG Tao, ZHU Xianqi, HAN Dongwei, et al. Influence of grid-connected DC suppression device on distance protection of transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 545-550.
- [10] 胡志广, 王峰, 蔡泽祥. 变压器直流偏磁抑制装置及其对继电保护影响的分析[J]. 广东电力, 2007, 20(10): 20-23.
- HU Zhiguang, WANG Feng, CAI Zexiang. Analysis of transformer DC bias blocking device and its impact on relay protection of AC system[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(10): 20-23.
- [11] 王颖, 刘春明, 刘连光, 等. 电网地磁感应电流在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 112-115.
- WANG Ying, LIU Chunming, LIU Lianguang, et al. An online monitoring system of geomagnetically induced current in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 112-115.
- [12] 董霞, 刘志珍, 宁大海, 等. 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, et al. 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.
- [13] 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.
- [14] 朱晓彤, 赵青春, 李园园, 等. 防止过负荷时相间距离Ⅲ段保护误动的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 7-11.
- ZHU Xiaotong, ZHAO Qingchun, LI Yuanyuan, et al. A new method to prevent maloperation of phase-to-phase zone III relays due to overload[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 7-11.
- [15] 方天宇. 双回路接地距离保护的分析和整定[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 43-45.
- FANG Tianyu. Analysis and setting of ground distance relays on double circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 43-45.
- [16] 柳焕章, 周泽昕. 线路距离保护应对事故过负荷的策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 112-117.
- LIU Huanzhang, ZHOU Zexin. Post-fault overload maloperation countermeasure of transmission line distance protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 112-117.
- [17] 蒋跃强, 陆志浩. 提高 500 kV 变压器过负荷能力的研究[J]. 华东电力, 2004, 32(1): 13-17.
- JIANG Yueqiang, LU Zhihao. Research on enhancement of overload capacity for 500 kV transformer[J]. East China Electric Power, 2004, 32(1): 13-17.

收稿日期: 2014-04-06

作者简介:

郑涛(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化及继电保护;

卢婷(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: lt_luting@163.com

杨国生(1977-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。