

研
究
开
发

地磁暴侵害高铁车辆 变压器油箱的探究

钱学成, 尹燕霖, 李扬, 刘明光, 陈佳

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)



作者简介: 钱学成(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压绝缘。

摘要: 分析了地磁暴产生的原因, 探究了 GIC 在高铁 AT 供电方式下侵入动车组车辆牵引变压器的机理, 以 CRH2 型动车组为例, 利用 Maxwell 软件仿真, 分析了不同数值的 GIC 对高铁车辆变压器油箱的电磁系统和损耗造成的影响。

关键词: 地磁暴; 高铁车辆; 变压器油箱; 电磁系统; 油箱损耗

中图分类号: P318; U266.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2015)06-0045-04

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.06.012

Analysis on Geomagnetic Storms Affecting Transformer Oil Tank of High-speed Railway Vehicle

QIAN Xuecheng, YIN Yanlin, LI Yang, LIU Mingguang, CHEN Jia

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Mechanism of geomagnetic storms generation and geomagnetical induced current (GIC) affecting the transformer oil tank of high-speed railway vehicle under the way of AT power supply was introduced. By Maxwell software simulation, effect of different GIC values on the electromagnetic characteristics and oil tank losses of the CRH2 EMUs transformer tank was analyzed.

Keywords: geomagnetic storms; high-speed railway vehicle; transformer oil tank; electromagnetic system; oil tank losses

0 引言

地磁暴侵害国内电力系统的事件有很多, 文献 [1] 报道了 2004 年 11 月 7~10 日, 广东岭澳核电站监测到强烈磁暴, 核电站变压器中性点 GIC 监测数据显示 GIC 最大值高达 75.5 A, 引发换流变压器严重直流偏磁; 文献 [2] 阐述了强磁暴期间, 500 kV 阳城至淮安输电系统的上河变电站变压器噪声增强, 油箱损耗增大。国外已经有文献报道了美国 1921 年 5 月铁路系统遭受地磁暴侵害事件和 1982 年 7 月瑞典电气化铁路由于太阳剧烈活动而异常工作^[3-5]。高铁接触网导线作为一条长距离输电线路暴露在野外, 地磁暴的产生也会对我国高铁造成不良后果, 所以我们有必要预先对此影响展开研究。

1 地磁暴产生机理

太阳以 10~11 年为一个周期爆发大量耀斑, 太阳黑子数量随之急剧增长, 这个时期太阳向外喷射的大量等

离子体以 300~1000 km/s 的速度在星际中传播到地球近空, 形成地磁暴^[6]。地磁暴的产生将导致地球表面不同地理位置处产生不同的电位, 引发电势差 ESP。ESP、地面长导体和大地三者组成回路, GIC 在此回路中产生并流通, 如图 1 所示。GIC 的频率在 0.001~0.1 Hz 之间, 为准直流^[7]。

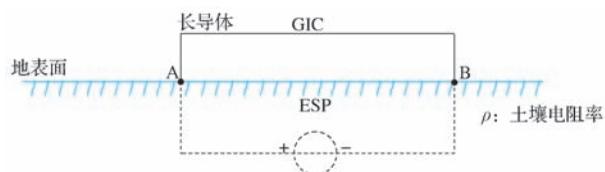


图 1 地面感应电势及感应电流示意图

我国高铁大多以 AT 供电方式运行, 接触网导线相当于地面长导体, 牵引变电所接地, 自耦变压器中点也接地, 回路中引发的 GIC 通过高铁受电弓从接触网导线侵入 CRH2 型动车组车辆变压器中, 如图 2 所示。

变压器油箱是变压器的重要组成部分, 变压器油箱工作异常, 可能导致变压器局部放电^[8]。变压器直流偏磁时, 铁心半周波饱和, 漏磁增大, 漏磁通穿过变压器油箱壁后会在油箱壁内产生涡流损耗, 由此导

致油箱的温度升高，并在涡流损耗集中的区域形成局部过热。油箱温度升高后，绕组中产生的热量不能有效地散发出去，此时降温受到干扰，使直流偏磁问题产生的局部过热问题更加严重，影响变压器绝缘性能，造成变压器寿命减少^[9]。

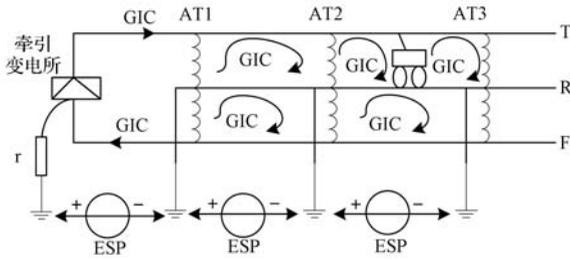


图 2 接触网中的 GIC 流通图

2 CRH2 型动车组车辆变压器的模型建立

CRH2 型动车组车辆变压器参数取自文献 [10]，容

量 $P=3\ 060\ \text{kVA}$ ，高压侧电压 $U_1=25\ \text{kV}$ ，额定电流 $122\ \text{A}$ ；低压侧电压 $U_2=1\ 500\ \text{V}$ ，额定电流 $857\ \text{A}$ ；辅助绕组侧电压 $U_3=400\ \text{V}$ ，额定容量 $490\ \text{kVA}$ ；油箱的壁厚为 $5\ \text{mm}$ 。本文采用 2 套偶对称边界，使得全模型的车辆变压器变成 1/4 模型，理论上求解效率可以提高 4 倍。由此建立的带有油箱的变压器负载模型，如图 3 所示。

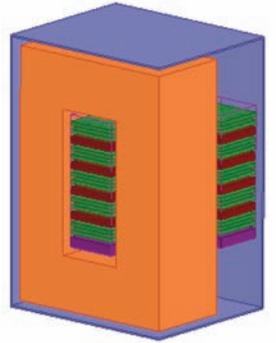


图 3 带有油箱壁的变压器模型

文献 [11] 指出在铁路系统中产生 GIC 的大小可能达到几安培甚至十几安培，所以本文在 CRH2 型动车组车辆变压器中分别施加直流电流值为 $0\ \text{A}$ 、 $1\ \text{A}$ 、 $5\ \text{A}$ 、 $20\ \text{A}$ ，以分析车辆变压器的油箱壁磁通密度随直流量增加的变化情况。

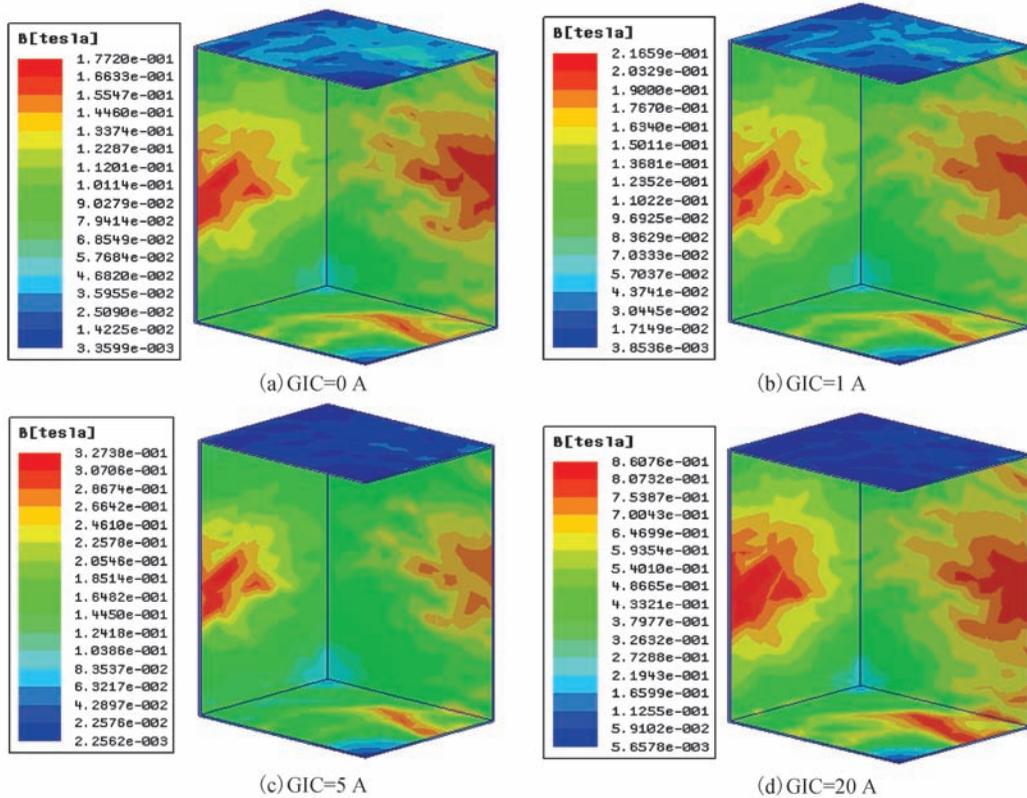


图 4 不同数值的 GIC 下变压器油箱磁通密度分布图

图 4 显示了某一时刻，在车辆变压器一次侧线圈分别通入 GIC(直流) $0\ \text{A}$ 、 $1\ \text{A}$ 、 $5\ \text{A}$ 、 $20\ \text{A}$ 的磁通密度分布图。可以看出油箱磁通密度的变化与变压器的直流偏磁程度密切相关，随着直流量的增加，油箱壁各点对应的磁通密度不断增大。当 $\text{GIC}=0\ \text{A}$ 时，变压器油箱壁磁通密度幅值为 $0.177\ \text{T}$ ；当 $\text{GIC}=20\ \text{A}$ 时，油箱壁的磁通密度幅值已经达到 $0.86\ \text{T}$ 。

为了更好地研究变压器油箱中的磁通密度分布，以便于在合适的位置采取措施降低直流偏磁对变压器油箱的影响，本文选取了油箱壁上 2 个典型位置，分别为油箱壁的两条边 X_1 和 X_2 ，如图 5 所示。

当车辆变压器处于不同的直流偏磁程度时，可以得到 X_1 、 X_2 处的磁通密度如图 6 所示。

图 6 中横坐标表示直线段的长度 (“ $0\ \text{mm}$ ”即横坐标的起始位置，表示直线段的最左端或者最顶端；横坐标的末端表示直线段的最右端或者最底端)，可以看出，油箱侧壁边的磁通密度一般要大

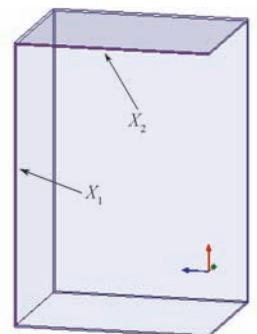


图 5 变压器油箱的典型位置划分

于油箱顶部边的磁通密度, 且靠近铁心柱处的磁通密度较大。表 1 给出了通入不同数值的 GIC 时, 变压器油箱 X_1 、 X_2 位置处的磁通密度幅值的计算结果。

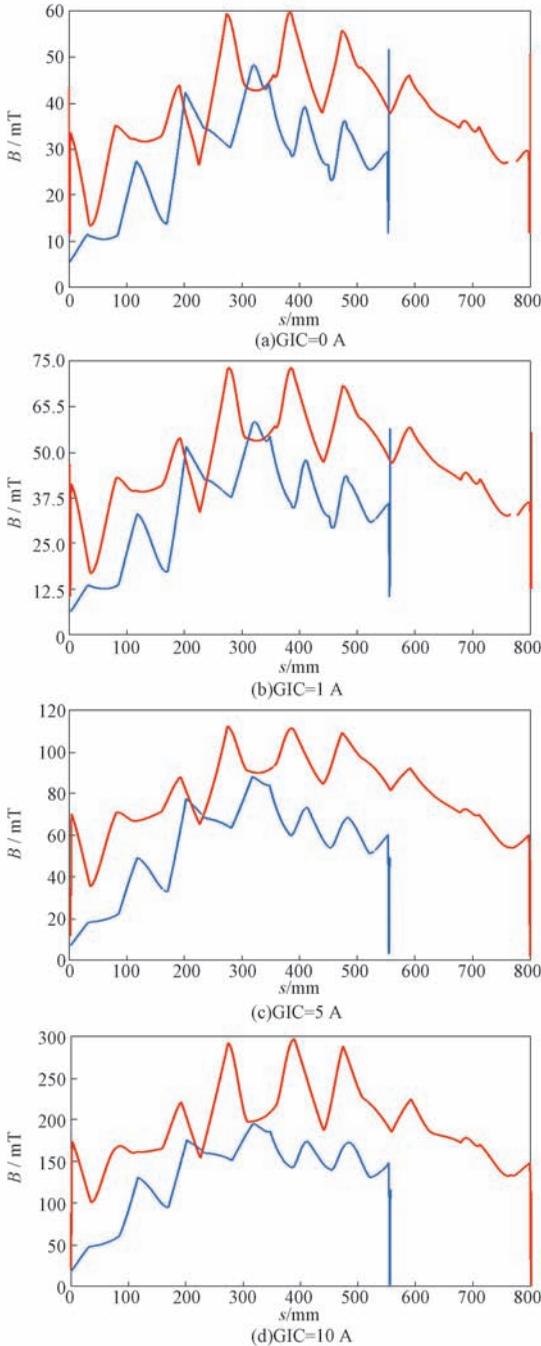


图 6 不同数值的 GIC 下变压器油箱壁 X_1 、 X_2 位置处的磁通密度曲线

根据表 1 的计算结果, 可以得到变压器油箱的磁通密度随直流量的变化规律, 见图 7。

根据图 7 可知, 变压器油箱侧壁和上壁在正常工作状态下的磁通密度比较接近, 2 个位置的磁通密度随着直流量的增加而不断增加。线段 X_1 处的磁通密度幅值的变化速率要大于线段 X_2 处的磁通密度幅值变化率, 这是因为直流偏磁程度越大, 铁心束缚磁力线的能力越弱。因此漏磁通密度会随着直流偏磁程度的增加而增加, 漏磁通密度的增加会造成油箱磁通密度的增加。线段 X_1 为变压器的侧边, 更加靠近铁心, 铁心处磁密

较集中, 故变化速度较线段 X_2 (顶边) 快。

表 1 变压器油箱在不同数值 GIC 下的磁通密度幅值

GIC/A	线段 X_1 磁通密度幅值 /mT	线段 X_2 磁通密度幅值 /mT
0	59.527 3	48.145 5
0.5	66.127 5	53.070 1
1	72.769 1	58.209 3
5	72.235 1	56.893 5
10	111.562 6	87.959 2
20	296.523 4	195.315 7

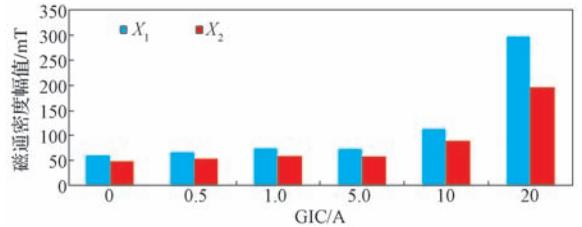


图 7 变压器油箱的磁通密度幅值与不同数值 GIC 的关系

3 油箱损耗的计算

油箱处于变化的磁场中, 油箱内部会感应出涡流, 涡流的产生带来了涡流损耗。由于集肤效应, 油箱中的磁场和电场都集中在油箱的表面, 磁场强度和电流密度等相关的电磁的振幅都会沿着导体的纵深度按照指数规律衰减。通常用透入深度 d 表示场量在导体中的集肤程度:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$$

式中: μ 为油箱材料的磁导率; σ 为油箱材料的电导率。

油箱的损耗和变压器的尺寸、短路阻抗、铁心的磁通量等等因素有关, 油箱的损耗公式为

$$p = \frac{kfh^3(\Delta U_x)^2\phi_m^2 \times 10^4}{50L[h+2(r_1+r_2)]} \quad (1)$$

式中: k 为固定系数 (当油箱的外表面是平面时, $\Delta U_x \leq 10.5\%$, $k=2.2$, $\Delta U_x > 10.5\%$ 时, $k=1.47$); ϕ_m 为铁心中的磁通量幅值; r_1 、 r_2 分别为主漏磁路及油箱的平均半径; ΔU_x 为短路电压的无功分量的百分数。

按照变压器油箱损耗计算公式 (1), 结合 Maxwell 电磁场仿真软件, 仿真得到 CRH2 型动车组车辆变压器的油箱负载损耗。计算额定负载情况下, 不同直流偏磁时的油箱损耗如图 8 所示。

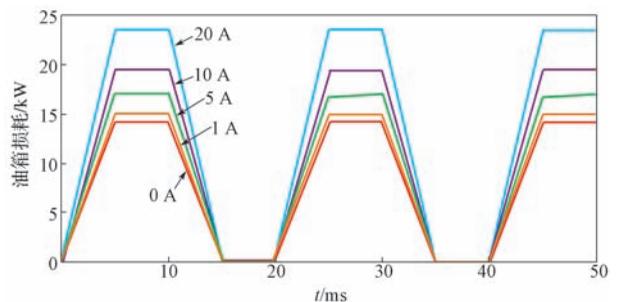


图 8 变压器的油箱损耗

图 8 曲线的高度随着 GIC 的增加而增加, 取油箱

损耗的一个周期 (20~40 ms)，可以得到油箱损耗的平均功率^[12]，如表 2 所示。

表 2 不同数值 GIC 下的油箱损耗

直流偏磁电流 /A	0	0.5	1	5	10	20
负载油箱损耗平均功率 /kW	9.89	10.02	10.68	12.78	14.36	17.13

油箱损耗随着时间和不同数值 GIC 的变化其三维图形如图 9 所示。由图 8、图 9 和表 2 可以看出：变压器的油箱损耗也随着直流量的增加而增加，当直流流量达到 20 A 时，油箱的损耗已经达到 17.13 kW，比无 GIC 时的油箱损耗多了 7.24 kW，此时的影响是不容忽视的。为了降低变压器直流偏磁情况下在油箱上产生的损耗，可以在特定位置安装不导磁钢来代替普通钢板，且尽量将油箱侧壁做厚，例如采用无磁钢板或者不锈钢板。对于大面积的油箱内壁一般可以安装屏蔽板，此措施是让漏磁通尽可能通过导磁性能较好的屏蔽装置来改变漏磁通的通过线路，使漏磁通穿过该导磁体而不穿入油箱壁的钢板，避免漏磁通在穿过油箱壁时产生更大的涡流损耗，引起油箱局部过热。所以在特定位置安装不导磁钢板和在油箱内部安装屏蔽的措施能有效缓解直流偏磁时变压器油箱局部过热的问题。

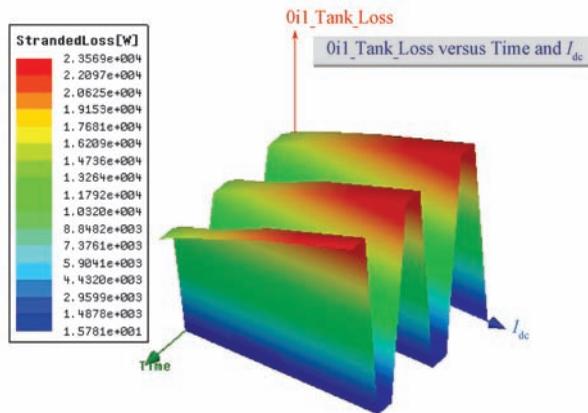


图 9 油箱损耗 3D 图

4 结语

本文率先提出了地磁暴侵入高铁接触网的可能性，并分析了 GIC 侵入 CRH2 型动车组车辆变压器的机理。

根据 CRH2 型动车组车辆变压器的技术参数，结合 Maxwell 软件建立了车辆变压器 1/4 模型。计算结果表明：随着在车辆变压器初级线圈通入 GIC 数值的增加，变压器直流偏磁程度增强，油箱各点处对应的磁通密度也随之增大，油箱损耗也会增大，对变压器的正常运行造成严重的后果。我国高铁正处于大发展时期，应该高度重视地磁暴对高铁车辆变压器油箱造成的影响，以确保高铁安全稳定运营。

参考文献：

- [1] 刘春明. 中低纬电网地磁感应电流及其评估方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 45-90.
- [2] 王倩. 直流输电及磁暴引起的变压器直流偏磁问题的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2006: 7-11.
- [3] Pitsyna N G, Kasinsky V V, Villoresi G, et al. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway [J]. Advances in Space Research, 2008, 42(9), 1510-1514.
- [4] Viljanen A, Pulkkinen A, Pirjola R, et al. Recordings of geomagnetically induced currents and a now casting service of the finnish natural gas pipeline system [J]. Space Weather the International Journal of Research & Application, 2006, 4(10): 239-251.
- [5] Wik M, Pirjola R, Lundstedt H, et al. A Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems [J]. Annals Geophysical, 2009, 27(4): 1775-1787.
- [6] Pitsyna N G, Kasinskii V V, Villoresi G, et al. Geomagnetic Effects on Mid-Latitude Railways: A Statistical Study of Anomalies in the Operation of Signaling and Train Control Equipment on the East-siberian Railway [J]. MedSci Entry for Advances in Space Research, 2008, 42(9): 1510-1514.
- [7] 钱学成, 刘明光, 刘铁, 等. 地磁暴对轨道电路电磁干扰的机理分析 [J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 42-46.
- [8] 米西岩. 一台变压器局部放电问题的分析判断 [J]. 变压器, 2010, 47(6): 70-71.
- [9] 蒯狄正. 直流偏磁对变压器的影响 [J]. 中国电力, 2004, 37(8): 41-42.
- [10] 王瑾. 弓网离线时车载变压器直流偏磁及其抑制方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [11] 范婷霞. 强磁暴对轨道电路的影响分析 [J]. 铁道通信信号, 2012, 48(7): 6-7.
- [12] 李季. 电力机车主变压器油箱损耗的三维有限元分析 [J]. 高压电器, 2005, 41(3): 186-187.

动态消息

第二届期刊优秀论文评选通知

2014 年度《机车电传动》成功举办了第一届优秀论文评选，经过多方推荐和专家评审，采用定性和定量相结合的评价方式，评选出了 10 篇获奖优秀论文，收获了积极反响。为了继续吸引和催生优秀稿件，提高刊物的学术水平

和质量，特此举办 2015 年度优秀论文评选，欢迎各位读者作者踊跃参加，积极推荐。

评选范围为 2011 ~ 2014 年在《机车电传动》期刊上刊发的论文。采用自荐和他荐相结合的方式产生候选论文，推荐截止日期为 2015 年 12 月 31 日。获奖论文将颁发获奖荣誉证书和丰厚奖金，并优先推荐参加中国科协优秀论文评选。请登录本刊网站查看具体评选办法并下载推荐表格。

《机车电传动》编辑部