

地磁暴侵害牵引供电系统的研究

我国的电气化铁路正处于大发展时期，铁路的建设和运营中存在众多的安全技术问题亟待解决。牵引供电乃至整个信号系统的电磁环境关系到行车的安全。地磁暴是一种极端的空间灾害性天气，引起地球的磁场剧烈扰动，地表面产生感应电动势（Earth Surface Potentials, ESP）。ESP、接触网和大地三者之间构成回路，就在牵引供电系统中引发了地磁感应电流（Geomagnetically Induced Current, GIC）。建立了磁暴侵害电气化铁路系统的GIC等效电路模型，并给出了GIC的算法，估算了流过牵引网和机车中GIC的大小，为进一步研究磁暴对电气化铁路系统的影响和防治策略奠定了基础。

钱学成/国网江苏省电力公司常州供电公司 张晨云/中国铁道科学研究院标准计量研究所 尹燕霖/国网山西省电力公司晋城供电公司 李 扬/国网冀北电力有限公司唐山市曹妃甸区供电分公司 李 阳/国网浙江省电力公司杭州供电公司

0 引言

地磁暴是一种极端的空间灾害性天气，会给铁路系统带来电磁环境干扰，从而影响列车行车安全。目前，已经有研究表明地磁暴能侵害地球表面的强电设备及弱电系统。2001年3月~2002年10月，我国江苏阳城—淮阴输电系统上河、武南变电站的主变压器多次发现持续时间长达1~2 h的噪声异常现象，经过专家们多方分析并与磁暴发生时间进行比较，认为事故发生是由于GIC导致的变压器直流偏磁所致^[1]。文献[2]中指出地磁暴能使高铁车载变压器的油箱损耗增加，磁密分布异常。在1921年5月15~16日，较大数量级的地磁暴引起纽约市125街纽约中央铁路的整个信号和交换系统失效，全球电报服务业中断^[3]。

国家自然科学基金项目（41374189）。

以往对GIC的计算大多集中于GIC在电网输电线路中的数值计算，甚少涉及到牵引供电系统。芬兰气象局和芬兰电力公司在20世纪80年代初曾针对芬兰±400 kV高压电网开展了GIC分析与监测工作，并且对电网结构、变压器等设备进行了相应的改造^[4]，中科院地球物理研究所进行的研究主要集中在假定的电网GIC条件下建立变压器数学模型，然后通过几台电动机验证其补偿、削弱和消除GIC的方法，其研究侧重于变压器机构与电网GIC的关系^[5-6]。

类相比于电网输电线路，牵引供电系统中也存在着接地点和导线构成的物理回路，推断出地磁暴也能在牵引供电系统中产生GIC，对电气化铁路造成不良影响，所以有必要预先对此影响展开研究。本文着重讨论的是磁暴所产生的GIC在牵引供电系统中的流通路径，以及该情况下牵引供电系统的等效电路模型，推导出流经牵引供电系统GIC的大小与供电方式间的关系。

1 GIC侵入牵引供电系统的机理

地磁暴发生时，根据电磁感应定律：极电流作用所形成的磁场与受到扰动后地磁场合成一个时变的磁场，会引发地表产生ESP，ESP作用在牵引供电系统中的接地点，在接地点、接触网和大地中形成GIC，如图1所示，从而影响供电系统的安全运行。如果地磁暴侵入牵引供电系统，GIC就会对其中的电磁型设备产生不良影响，如在牵引变压器和自耦变压器上产生直流偏磁，变压器铁心



钱学成/助理工程师

关键词/Keywords

牵引供电·
磁暴·
GIC·
等效电路·

饱和, 损害寿命, 甚至威胁整个电气化铁路的正常运行状态。

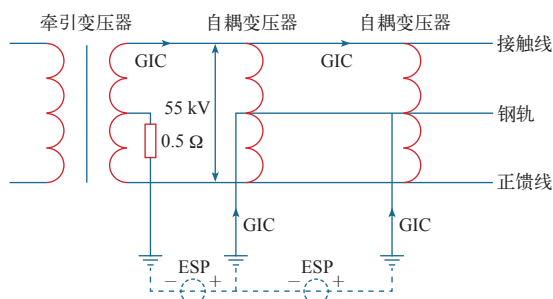


图1 牵引供电系统中的GIC产生机理

在强磁暴期间, 有些地区的土壤电导率较低, 因此可以产生很大的地表电动势, 高达 $1 \sim 10 \text{ V/km}^{[7]}$ 。在靠近极地地区或高磁纬地区, ESP可能更高; 研究监测表明: GIC的频率在 $0.001 \sim 0.1 \text{ Hz}$ 之间, 相对于 50 Hz 的工频电流而言, 可视为一准直流^[7]。

牵引供电系统是否会受到GIC的影响, 影响程度如何, 是通过怎样具体的方式影响, 都是有关国计民生的重要问题。有必要开展探讨地磁暴侵害牵引供电系统的电路模型与算法, 展开铁路一次、二次电气系统磁暴效应的科学试验研究工作, 为下一阶段的研究内容做好准备。包括建立GIC侵害铁路电气系统的电路理论模型和算法, 以及侵害牵引变压器、在线监测点问题的理论评估与选点, 选择监测点开展磁暴侵害铁路牵引系统实时监测试验, 获得磁暴侵害铁路的观测数据; 并根据铁路磁暴干扰的数值仿真和实际观测结果, 深刻地理解、认识强磁暴的影响以及导致灾害的风险等工作, 以引起高铁设计与运营管理部门的重视。

2 地磁暴ESP的计算

平面波理论指出: 在地磁暴发生时, 高能粒子流距离地表面无限远处, 故可假设粒子流为面积无限大、电流密度恒定以及距地面无限远的片状电流或线状电流, 粒子流诱发的地磁场可视为垂直于地面的平面波。假设地面为近似平面, 且地表电导率均匀不变, 通过用仪器测量磁暴发生

时的地磁场水平分量 B_x 与 B_y , 根据Maxwell方程和Faraday感应定律, 可估算水平感应电场 E_x 与 E_y 的大小, 从而得到磁暴所诱发的ESP。感应电场的计算公式可以整理为

$$E(t) = -\frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma}} \int_0^\infty \frac{g(t-u)}{\sqrt{u}} du \quad (1)$$

式中, $E(t)$ 为水平感应电场 E_x 或 E_y ; μ_0 为真空电导率; σ 为地表电导率; $g(t)$ 为地磁场水平分量 B_x 或 B_y 的变化率。

实际上, 地表的电导率并不均匀, 根据线路在相应分区内的长度来估算各分区内所对应土壤电导率的加权重, 各分区足够大, 最后形成“合理平均化”后的新土壤电导率, 即

$$\sigma^* = \gamma_1\sigma_1 + \gamma_2\sigma_2 + \dots + \gamma_n\sigma_n = \sigma(n) \quad (2)$$

式中, σ^* 为加权后的土壤电导率; n 为线路走廊进行分区数; $\sigma(n)$ 为加权后的土壤电导率函数; $\gamma_1 \sim \gamma_n$ 为各分区加权重; $\sigma_1 \sim \sigma_n$ 为各分区对土壤的电导率。

将式(2)的计算结果 σ^* 替换式(1)中的 σ , 就可得到改进的感应电场公式。作用在地面接地点AB两点之间的等效电压源ESP可简化为

$$U_{AB} = L_{AB}(E_x \sin \theta + E_y \cos \theta) \quad (3)$$

式中, L_{AB} 为长导体AB两点间距离; θ 为长导体AB两端点连接线与Y轴(东西方向)之间的夹角。

得到ESP后, 即可依据牵引网的结构, 并按照基尔霍夫电流定理或者基尔霍夫电压定律来计算GIC。

3 牵引供电GIC电流计算

3.1 磁暴下GIC流通过程模型

以DF供电方式为例, 来研究磁暴条件下的GIC在牵引供电网中的流通过程, 物理模型如图2所示。由于GIC相当于准直流, 所以略去线路中的电容和电感; 钢轨敷设在道床上, 为分布参数, 对地泄漏以电阻为主, 设单位长度的泄漏电阻为 R_0 ; 钢轨单位长度的纵向电阻为 r_0 ; 牵引变电所接地网的接地电阻为 r ; 接触网单位长度等效电阻为 R_L 。

图3为牵引供电GIC的计算模型。假设供电臂

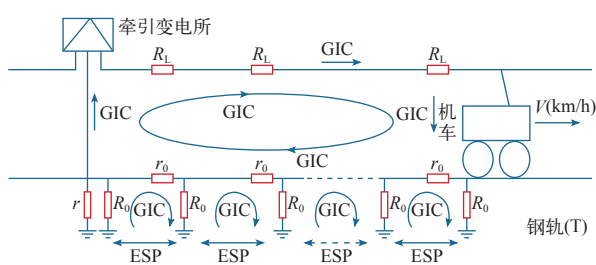


图2 GIC在供电网中的流通路径等效电路

长度为40 km，列车运行位置到牵引供电所的距离为 n （为方便计算， n 取1~40的整数），每隔1 km做一次集中接地等效，得到 $n+1$ 节点网络。

可以采用节点电压法或回路电流法计算上述电

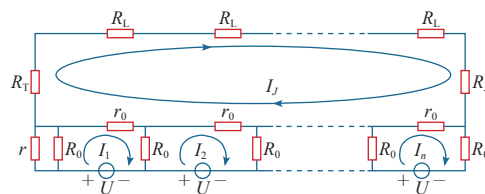


图3 牵引供电GIC的计算模型

路中各条支路上的GIC大小，本文用回路电流法进行计算，设 I_1 、 I_2 、 $\dots$ 、 I_n 、 I_J 分别代表各回路电流， U 代表单位长度的ESP峰值，可以列出如下方程

$$\mathbf{Z} \times \mathbf{I} = \mathbf{U} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ \dots \ I_n \ I_J]^T$ ， $\mathbf{U} = [U \ U \ U \ \dots \ U \ 0]^T$ ，则得到矩阵方程

$$\begin{pmatrix} R_0 // r + r_0 + R_0 & -R_0 & & & & -r_0 \\ -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & & & -r_0 \\ & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & & -r_0 \\ & & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & -r_0 \\ & & & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -r_0 \\ & & & & \ddots & \vdots \\ & & & & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -r_0 \\ -r_0 & -r_0 & -r_0 & -r_0 & -r_0 & \dots & -r_0 & R_T + R_J + n(R_L + r_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ \vdots \\ I_n \\ I_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ U \\ U \\ U \\ \vdots \\ U \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

求解式（5），可计算出流过牵引网的电流 I_J ，由于网络内节点众多，需要借助Matlab软件编写程序实现对牵引网电流 I_J 的求解。

3.2 参数计算

（1）牵引变压器等效电阻 R_T

典型三相牵引变压器主要技术参数如下：额定容量为20 000 kV·A；额定电压为110/27.5 kV；额定电流为105/420 A；空载电流为2.0%；空载损耗为28.66 kW；短路损耗为132.0 kW；短路电压为10.5%。

变压器的等效电阻为

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} = \frac{132.0 \times 27.5^2}{1000 \times 20^2} \Omega = 0.2496 \Omega \quad (6)$$

式中， P_k 为变压器的短路损耗，kW； S_N 为变压器的额定容量，MV·A； U_N 为变压器的额定电压，kV。

（2）接触网等效电阻 R_L

由于接触网中的物理构件主要包括承力索和接触线，所以本文将接触网电阻的计算实际简化

为承力索和接触线等效电阻的并联计算，各技术参数分别如下：接触线型号为GLCA-100/215，单位长度电阻 $r_1 = 0.184 \ \Omega/\text{km}$ ；承力索型号为GJ-70，单位长度电阻 $r_2 = 0.2 \ \Omega/\text{km}$ 。

则接触网单位长度电阻为

$$R_L = \frac{0.184 \times 0.2}{0.184 + 0.2} \Omega/\text{km} = 0.168 \Omega/\text{km} \quad (7)$$

（3）钢轨对地泄漏电阻 R_0

钢轨对地的泄漏电阻，其主要部分是由钢轨、道碴和路基的电流泄漏电阻组成的。国外铁路综合接地系统的钢轨泄漏电阻是按1 Ω 进行设计，一般电化区段在晴天时，泄漏电阻仅为2~5 Ω/km ，我国高速铁路和客运专线采用无砟钢轨，由于道床较厚且高架线路比重大，钢轨对地的泄漏电阻普遍较高，高达100~500 Ω/km [9]。

（4）机车电阻 R_J

SS4型电力机车用变压器的主要技术参数如下：额定容量为4 760 kV·A，短路损耗为53.564 kW，空载损耗为6.4 kW。

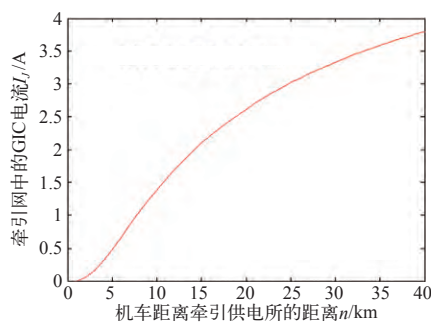
于是车载变压器的等效电阻

$$R_j = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} = \frac{53.564 \times 27.5^2}{1000 \times 4.76^2} \Omega = 1.7878 \Omega \quad (8)$$

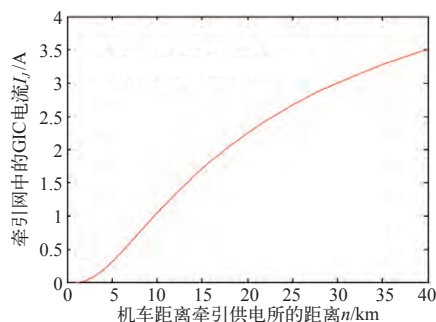
3.3 电气化铁路GIC电流估算

文献[9]中指出：当发生强磁暴时，我国感应地电场每千米最大值可达1 V，因此，本文中取 $U=1$ V。在计算过程中，假设电力机车在 $t=0$ 时刻从牵引变电所出发，计算得出在不同钢轨对地泄漏电阻情况下，流过牵引网的GIC与机车到牵引供电所距离 n 的关系如图4所示。

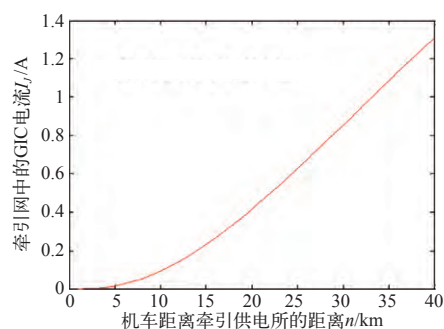
可以看出，流过牵引网的GIC随着机车与牵引供电所距离的增加而增加，GIC在供电臂末端



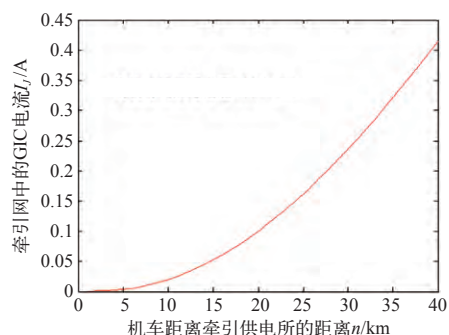
(a) 钢轨对地泄漏电阻1 Ω/km



(b) 钢轨对地泄漏电阻2.5 Ω/km



(c) 钢轨对地泄漏电阻100 Ω/km



(d) 钢轨对地泄漏电阻500 Ω/km

图4 GIC与机车到供电所的距离 n 的关系图（单边供电）

达到最大值。在同样距离情况下，钢轨对地泄漏电阻越大，流过牵引网的GIC越小。当泄漏电阻为1 Ω/km 时，牵引网中电流最大已经达到3.75 A；而泄漏电阻为500 Ω/km 时，牵引网中的电流最大值仅为0.42 A。3.75 A的直流分量侵入变压器中，会使牵引变压器、车载变压器的励磁电流增大，铁心饱和，铜耗增加，线圈发热，严重影响变压器寿命，从而影响运行的安全^[10]。

当采用单边全并联方式给机车供电时，节点数加倍，上述矩阵方程中的 Z 矩阵相应变为

$$\begin{pmatrix} R_0 // r + r_0 + R_0 & -R_0 & & & & & -r_0 \\ -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & & & & -r_0 \\ & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & & & -r_0 \\ & & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & & -r_0 \\ & & & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -R_0 & -r_0 \\ & & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & & & -R_0 & R_0 + 2r_0 & -r_0 \\ -r_0 & -r_0 & -r_0 & -r_0 & -r_0 & \cdots & -r_0 & R_T + R_j + \frac{n(80-n)}{80} R_L + nr_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

只考虑钢轨对地的泄漏电阻为1 Ω/km 时，流过牵引网的GIC与机车到牵引供电所距离 n 的关系

对比如图5所示。

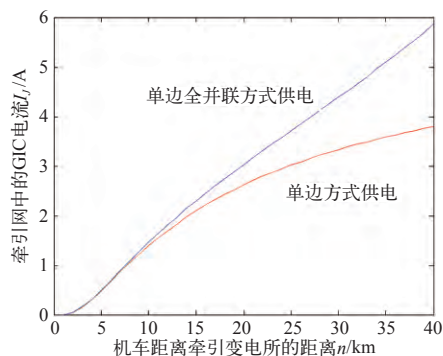


图5 GIC与机车到供电所的距离 n 的关系图
(单边全并联供电)

可以看出,在单边全并联方式供电下,GIC随着机车距牵引变电所的距离 n 基本呈线性上升,在供电臂末端达到最大值约为6 A。在相同距离时,单边全并联方式下流过牵引网的GIC要高于单边供电下的GIC,且两者之差随着机车到牵引变电所距离的增加而增加,在供电臂的末端可达最大差值2 A。

4 结束语

磁暴产生的GIC能侵入牵引供电系统中,机车到牵引变电所的距离相同时,GIC的数值与供电方式和钢轨对地泄漏电阻有关,可达到6 A。GIC引起的直流磁通与变压器原磁通叠加,使系统中的变压器励磁电流发生畸变,从而引发不良后果。为了抵御磁暴带来的危害,可以缩小供电臂的长度,增加泄漏电阻值,磁暴期间需禁用单边全并联供电方式。

参考文献

[1] 肖冬. 直流输电和磁暴引起变压器直流偏磁的相

关研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 2-3.

[2] 钱学成, 尹燕霖, 李扬, 等. 地磁暴侵害高铁车辆变压器油箱的探究 [J]. 机车电传动, 2015 (6): 45-48.

[3] Risto Pirjola. Calculation of geomagnetically induced currents (GIC) in a high-voltage electric power transmission system and estimation of effects of overhead shield wires on GIC modeling [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69(12): 1305-1311.

[4] 张燕秉. 电网地磁感应电流算法及仿真研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2005: 9-16.

[5] 薛向党, 郭晖, 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报, 1999 (6): 13-19.

[6] 薛向党, 郭晖, 郑云祥, 等. 在地磁感应电流作用时分析和计算电力变压器特性的一种新方法——时域和频域法 [J]. 电工技术学报, 2000, 15 (2): 1-5.

[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] 董文俊. 高速客运专线综合接地系统研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 20-21.

[9] 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: 10-60.

[10] 王瑾. 弓网离线时牵引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: 62-92.

(收稿日期: 2016-07-17) **EA**

中国知网 https://www.cnki.net

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告