



# 晚期 HEMP 作用下铁路牵引供电系统 GIC 算法研究

高志伟, 周于翔, 朱思熠

(石家庄铁道大学 信息科学与技术学院, 石家庄 050043)

**摘 要:** 高空核爆电磁脉冲晚期效应( $E_3$ )会引起地磁场剧烈变化并形成地面感应电场。感应电场等效为激励源与地面长距离导体和大地构成回路,产生地磁感应电流(GIC)。GIC可引起牵引供电系统中变压器直流偏磁,从而严重威胁牵引供电系统的安全运行。本文基于平面波理论、分层大地电导率模型并结合牵引供电系统的电路模型,提出 $E_3$ 作用下的牵引供电系统GIC算法,并以带回流线的直接供电方式的铁路牵引供电系统为例,首次计算了系统GIC情况。结果表明,该供电方式下牵引供电系统中的GIC远大于系统中变压器等设备的耐受值,为进一步研究 $E_3$ 作用下牵引供电系统效应及我国铁路设备选型、灾害防治等提供支撑。

**关键词:** 高空核爆电磁脉冲; 地磁感应电流; 分层大地电导率模型; 牵引供电系统

中图分类号: TM711

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210061

## Study on GIC algorithm of railway traction power supply system under action of late time HEMP

Gao Zhiwei, Zhou Yuxiang, Zhu Siyi

(School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The late effect of high-altitude electromagnetic pulse ( $E_3$ ) will cause dramatic changes in the Earth's magnetic field and form a ground induced electric field. The induced electric field is equivalent to forming a loop between the excitation source and the ground long-distance conductor and the Earth, generating a geomagnetic induction current (GIC). GIC can cause DC bias of the transformer in the traction power supply system, thereby seriously threatening the safe operation of the traction power supply system. Based on the plane wave theory, the layered Earth conductivity model and the circuit model of the traction power supply system, this paper proposes the GIC algorithm of the traction power supply system under the action of  $E_3$ , and takes the railway traction power supply system with return line direct power supply as an example. Calculating the system GIC situation shows that the GIC in the traction power supply system under this power supply mode is far greater than the withstand value of the transformer and other equipment in the system. The study provides support for further research on the effect of the traction power supply system under the action of  $E_3$ , the selection of our domestic railway equipment, and disaster prevention.

**Key words:** high-altitude electromagnetic pulse; geomagnetic induced current; layered earth conductivity model; traction power supply system

当核武器的爆炸高度在地表 30 km 以上时,会通过一系列物理过程产生高空核爆电磁脉冲(HEMP)。HEMP 在近地空间所产生的辐射场按时间变化可分为早期( $E_1$ )、中期( $E_2$ )、晚期( $E_3$ )<sup>[1]</sup>。 $E_3$ 会引起地磁场剧烈变化并形成地面感应电场,感应电场可等效为激励源并与地面长距离导体和大地构成回路,产生地磁感应电流 GIC<sup>[2]</sup>。GIC 可导致供电系统中变压器直流偏磁,造成变压器铁心严重磁饱和而无法正常工作<sup>[3-4]</sup>,最终影响供电系统的安全稳定运行。

目前, $E_3$ 对广域系统影响的研究主要集中在电网,如 James Gilbert 等人研究了  $E_3$  对北美电网的影响<sup>[5]</sup>, Trevor Hutchins 通过建立电力系统动态模型来评估  $E_3$  对电力系统的影响<sup>[6]</sup>, Raymund H. Lee 等人使用分层大地电导率模

\* 收稿日期:2021-03-01; 修订日期:2021-08-10  
联系方式:高志伟, Gao\_zhiwei@163.com。

型计算了  $E_3$  作用下北美电网 GIC 情况<sup>[7]</sup>。我国对  $E_3$  的研究起步较晚,但也取得了一定的成果。余同彬等人较早开展了  $E_3$  对架空长线缆的耦合效应研究<sup>[8]</sup>,赵志斌等人研究了  $E_3$  引起的变压器直流偏磁对电力系统稳定性的影响<sup>[9]</sup>,陈宇浩、谢彦召等人总结了  $E_3$  影响电网的故障链模式<sup>[10]</sup>。

铁路属于广域分布式系统,与电网有着相似的结构,存在被  $E_3$  影响的风险。铁路系统作为我国的关键基础设施,其安全运营不仅是保障我国国防安全的关键,也是科学研究的重点与民众关注的焦点。目前,  $E_3$  对广域系统影响的研究主要集中在电网,对铁路系统影响的研究基本处于空白。为此,本文开展了  $E_3$  作用下铁路牵引供电系统 GIC 算法研究,基于平面波理论与分层大地电导率模型建立  $E_3$  感应电场模型,并将  $E_3$  感应电场等效为牵引供电系统接地点间的激励源,根据铁路牵引供电系统电路模型采用回路阻抗法求解 GIC。以带回流线的直接供电方式牵引供电系统为例,初步评估了  $E_3$  产生的效应。该研究为进一步研究  $E_3$  作用下牵引供电系统效应及我国铁路设备选型、灾害防治等提供支撑。

## 1 $E_3$ 感应电场标准

目前,  $E_3$  感应电场标准主要由国际电工委员会 IEC 于 1996 年提出。IEC 提出的  $E_3$  感应电场表达式为<sup>[1]</sup>

$$E_3(t) = E_i(t) - E_j(t) \quad (1)$$

$$E_i(t) = \begin{cases} 0 & \tau \leq 0 \\ E_{0i} \cdot K_i(e^{-a_i t} - e^{-b_i t}) & \tau > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E_j(t) = \begin{cases} 0 & \tau \leq 0 \\ E_{0j} \cdot K_j(e^{-a_j t} - e^{-b_j t}) & \tau > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\tau = t - 1$ ;  $E_{0i} = 0.04$  V/m,  $E_{0j} = 0.01326$  V/m;  $a_i = 0.02$  s<sup>-1</sup>,  $a_j = 0.015$  s<sup>-1</sup>;  $b_i = 2$  s<sup>-1</sup>,  $b_j = 0.02$  s<sup>-1</sup>;  $K_i = 1.058$ ,  $K_j = 9.481$ 。

IEC 提出的  $E_3$  感应电场波形如图 1 所示,该波形采用电导率  $\sigma_g = 10^{-4}$  s/m 的均匀大地电导率模型,波形峰值约为 38.67 V/km,持续时间为 1~1000 s。

在计算由地磁扰动引起的地面感应电场上,越来越多的学者采用分层大地电导率模型,如 Ngwira 等人分别基于均匀和分层大地电导率模型计算了地磁暴作用下南非电网的 GIC,计算结果表明分层大地电导率模型具有更高的计算精度<sup>[11]</sup>;章鑫等人基于分层大地电导率模型计算了地磁暴作用下新沂、高邮等地的地面感应电场,计算结果与实测值相差较小,具有较高的准确度<sup>[12]</sup>。

分层大地电导率模型考虑了大地电导率的纵向变化,相较于均匀大地电导率模型,具有更高的精确性。此外,IEC 提出的  $E_3$  感应电场波形所采用的大地电导率较小,属于极端情况,因此为了提高  $E_3$  作用下铁路牵引供电系统 GIC 计算精度,使计算结果接近实际情况,本文提出一种基于分层大地电导率模型并结合平面波理论的  $E_3$  作用下铁路牵引供电系统 GIC 算法。

## 2 $E_3$ 作用下铁路牵引供电系统 GIC 算法

### 2.1 $E_3$ 感应电场计算

目前计算由地磁扰动引起的地面感应电场的算法主要有平面波理论、合成镜像法。其中平面波理论适用于中、低纬度地区的地面感应电场计算,合成镜像法对于计算高纬度地区的地面感应电场比前者更为准确<sup>[13]</sup>。考虑我国大部处于中纬度地区,因此采用平面波理论计算地面感应电场。

根据平面波理论<sup>[14-15]</sup>,  $E_3$  作用下产生的感应电场  $E$  与磁场  $H$  之间的频域关系式为

$$E(\omega) = Z(\omega)H(\omega) = Z(\omega) \frac{B(\omega)}{\mu_0} \quad (4)$$

式中:  $\omega$  是角频率,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为频率;  $Z(\omega)$  为大地波阻抗;  $H(\omega)$  为磁场强度,  $H = B/\mu$ ;  $B(\omega)$  为磁感应强度;  $\mu$  为大地电导率,  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

#### (1) 分层大地电导率模型

分层大地模型如图 2 所示,假设模型中各层电导率横向分布均匀,各层的厚度分别为  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ , 各层电

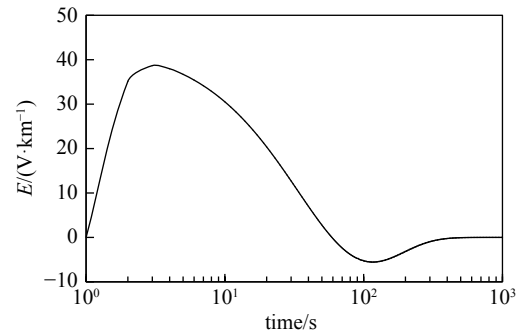


Fig. 1  $E_3$  induced electric field waveform proposed by IEC

图 1 IEC 提出的  $E_3$  感应电场波形

导率为  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$ , 各层阻抗为  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ 。

图 2 中, 除底层外其余各层需要考虑每一层之间边界处阻抗突变的影响, 以及层的深度, 即需要考虑每一层下面各层的影响。除  $n$  层外, 第  $i$  层的阻抗计算为

$$Z_i(\omega) = \frac{j\omega}{k_i} \frac{1 - L_i e^{-2k_i h_i}}{1 + L_i e^{-2k_i h_i}} \quad (5)$$

式中:  $k_i$  为传播系数,  $k_i = \sqrt{j\omega\mu\sigma_i}$ ;  $L_i$  为反射系数,  $L_i = \frac{\frac{j\omega}{k_i} - Z_{i+1}}{\frac{j\omega}{k_i} + Z_{i+1}}$ ,  $i=n-1, n-2, n-3, \dots, 1$ 。

图 2 中, 第  $n$  层阻抗见式(6)。从底层阻抗  $Z_n(\omega)$  出发, 通过反复递推式(5), 可得到计算  $E_3$  感应电场所需的地表波阻抗  $Z_1$ 。

$$Z_n(\omega) = \sqrt{\frac{j\omega}{\sigma_n \mu}} \quad (6)$$

## (2) $E_3$ 磁感应强度

本文根据 IEC 提出的  $E_3$  感应电场强度波形  $E(t)$  提取出  $E_3$  磁感应强度波形  $B(\omega)$ 。具体步骤如下:  
IEC 采用均匀大地电导率模型, 大地阻抗  $Z(\omega)$  为

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{j\omega}{\mu\sigma}} \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  是大地电导率, IEC 采用的  $\sigma=10^{-4}$  s/m。

通过快速傅里叶变换 FFT 将  $E(t)$  转换为  $E(\omega)$ , 将式(7)代入式(4)即可得到  $E_3$  磁感应强度  $B(\omega)$ 。

综上所述, 基于分层大地电导率模型与平面波理论的  $E_3$  感应电场计算流程如图 3 所示。图 3 中, 首先输入  $E_3$  感应电场强度波形  $E(t)$  及对应的均匀大地电导率  $\sigma_g=10^{-4}$  s/m, 根据式(4)和式(7)即可计算出  $E_3$  磁感应强度  $B(\omega)$ 。然后输入分层大地电导率模型的相关参数, 根据式(5)、式(6)计算出地表阻抗  $Z_1(\omega)$ , 将  $B(\omega)$  与  $z_1(\omega)$  代入式(4)并进行逆 FFT, 即可得到基于分层大地电导率模型下的  $E_3$  感应电场。

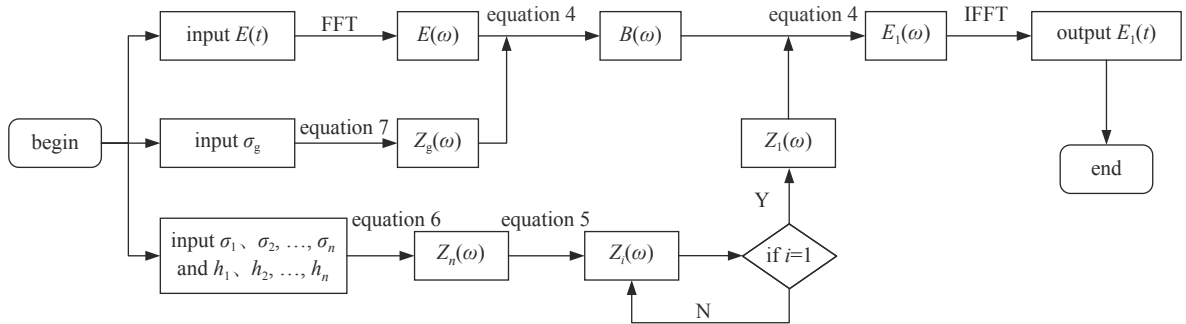


Fig. 3 Calculation process of  $E_3$  induced electric field based on layered earth conductivity model and plane wave theory

图 3 基于分层大地电导率模型与平面波理论的  $E_3$  感应电场计算流程

## 2.2 $E_3$ 感应电场等效

在 GIC 工程计算中, 常将  $E_3$  感应电场假设为均匀电场, 则接地点  $i$  与  $j$  之间的  $E_3$  感应电场等效激励源  $U_{ij}$  为<sup>[16]</sup>

$$U_{ij} = EL_{ij} \cos \theta' \quad (8)$$

式中:  $\theta'$  为铁路走向与  $E_3$  感应电场方向的夹角,  $L_{ij}$  为两接地点间直线距离,  $E$  为  $E_3$  感应电场强度。

## 2.3 牵引供电系统 GIC 计算方法

本文主要分析带回流线的直接供电方式牵引供电系统, 结合铁路实际情况与相关标准, 建立带回流线的直接供电方式牵引供电系统电路模型如图 4 所示。

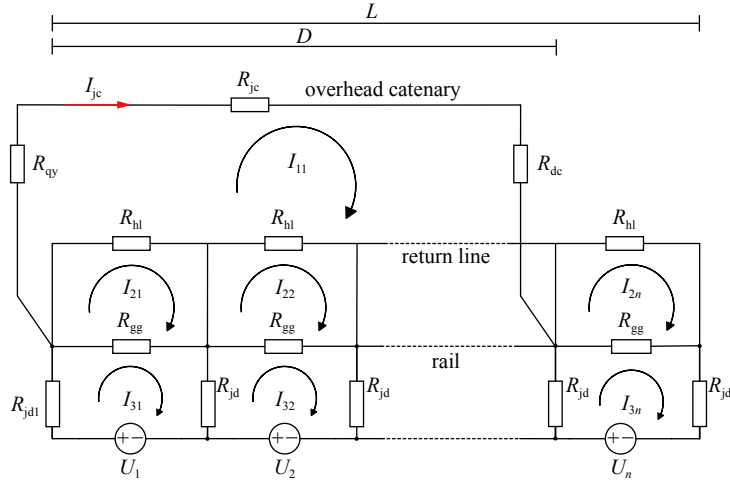


Fig. 4 Model of direct power supply with return line

图 4 带回流线的直接供电方式电路模型

由于 GIC 频率较低, 一般将其近似为准直流, 因此计算时可只考虑系统中的直流参数。图 4 中,  $R_{qy}$  为牵引变压器二次侧线圈直流电阻,  $R_{jc}$  为接触网直流电阻,  $R_{gg}$  为钢轨直流电阻,  $R_{jd}$  为接地电阻 ( $R_{jd1}$  为牵引变压器接地电阻, 其余为钢轨接地电阻),  $R_{hl}$  为回流线直流电阻,  $U$  为  $E_3$  感应电场等效激励源,  $R_{dc}$  为电力机车等效电阻。

$D$  为电力机车行驶距离,  $L$  为铁路长度。带回流线的直接供电方式下, 牵引供电距离单线一般为 30 km, 双线一般为 25 km。在钢轨接地方面, 回流线每隔一个闭塞分区通过吸上线 (铝芯或铜芯电缆) 与信号扼流圈中性点连接 (吸上线间距 3~5 km)<sup>[17]</sup>。

本文主要关注接触网、牵引变压器、车载变压器中的 GIC (图 4 中  $I_{jc}$ )。回路电流设为图 4 中所示, 其中  $I_{11}=I_{jc}$ 。采用回路阻抗法并根据回路电流列写回路阻抗方程组, 从而得到回路阻抗矩阵 [式 (9)], 即可计算出  $I_{jc}$  的大小。

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{21} \\ I_{22} \\ \vdots \\ I_{2n} \\ I_{31} \\ I_{32} \\ \vdots \\ I_{3n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{qy} + R_{jc} + R_{dc} + R_{jd1} + R_{jd}) & 0 & 0 & \cdots & 0 & R_{jd1} & 0 & \cdots & R_{jd} \\ 0 & R_{gg} + R_{hl} & 0 & \cdots & 0 & -R_{gg} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & R_{gg} + R_{hl} & \cdots & 0 & 0 & -R_{gg} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & R_{gg} + R_{hl} & 0 & 0 & \cdots & -R_{gg} \\ R_{jd1} & -R_{gg} & 0 & \cdots & R_{jd1} + R_{gg} + R_{jd} & -R_{jd} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -R_{gg} & \cdots & -R_{jd} & 2R_{jd} + R_{gg} & -R_{jd} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{jd} & 0 & 0 & \cdots & -R_{gg} & 0 & -R_{jd} & \cdots & 2R_{jd} + R_{gg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n U_i \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3 $E_3$ 作用下牵引供电系统 GIC 计算分析

以实际铁路带回流线的直接供电方式牵引供电系统为算例, 计算  $E_3$  作用下铁路牵引供电系统中的 GIC, 本文主要关注接触网、牵引变压器、车载变压器中的 GIC (图 4 中  $I_{jc}$ )。

#### 3.1 牵引供电系统参数

算例采用石太铁路阳泉段岩会-赛鱼供电区间, 该供电区间处于中纬度地区, 线路总长约 25 km, 钢轨大致每隔 5 km 接地, 如图 5 所示。为了简化计算, 假设该段铁路走向为正东-西方向。

牵引变压器为单相变压器, 型号: D11-QY-40000/220。车载变压器为 SS4 型电力机车的车载变压器, 型号: TBQ4-4760/25。变压器线圈直流、接地电阻及钢轨接地电阻均由实测获得<sup>[18-19]</sup>, 参数见表 1。

分层大地电导率模型选择典型华北地区分层大地电导率模型<sup>[20]</sup>, 该分层大地电导率模型共 4 层, 每层大地电导率为 [0.000 42 0.16 0.000 26 0.1] S/m, 每层深度为 [68 000 11 000 121 000  $\infty$ ] m, 如图 6 所示。

#### 3.2 GIC 计算结果及分析

分别采用 IEC 提出的  $E_3$  感应电场与基于分层大地电导率模型的  $E_3$  感应电场时, 接触网 GIC 计算结果如图 7

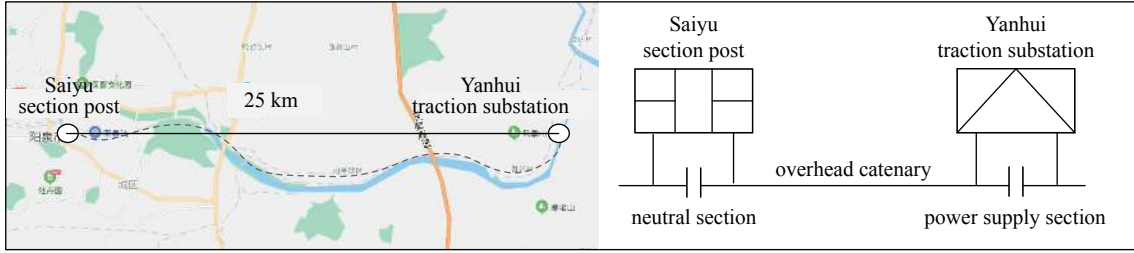


Fig. 5 Calculation example of direct power supply traction power supply system with return line

图 5 带回流线的直接供电方式牵引供电系统算例

表 1 带回流线的直接供电方式牵引供电系统算例参数

Table 1 Example parameters of traction power supply system with return line

equipment name	equipment type	DC resistance
overhead catenary	CTM-120	0.186 Ω/km
carrier cable	JTM-95	0.244 Ω/km
return line	LBGLJ-240	0.121 Ω/km
rail	P-50	0.032 Ω/km
traction transformer	D11-QY-40000/220	$R_{qy}=0.0197 \Omega$
on board transformer	TBQ4-4760/25	$R_{de}=0.5165 \Omega$
traction transformer grounding resistance	—	$R_{jd1}=0.21 \Omega$
rail grounding resistance	—	$R_{jd}=0.163 \Omega$

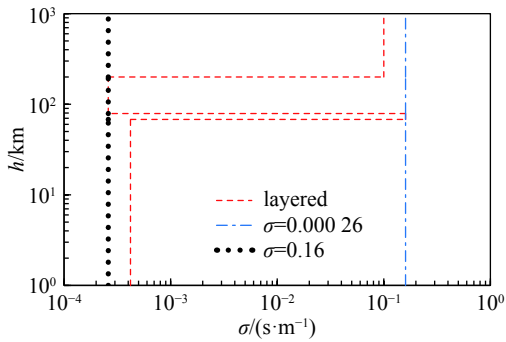


Fig. 6 Layered earth conductivity model for calculation

图 6 计算用分层大地电导率模型

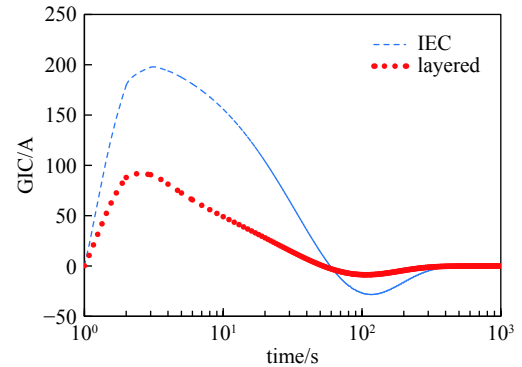


Fig. 7 Catenary GIC under different ground conductivity models

图 7 不同大地电导率模型下接触网 GIC

所示。图 7 中,假设  $E_3$  感应电场方向与铁路走向平行 ( $\theta=0^\circ$ ),电力机车处于供电分区末尾处。当采用 IEC 提出的  $E_3$  感应电场时,接触网 GIC 峰值可达 197.49 A;当采用基于分层大地电导率模型的  $E_3$  感应电场时,接触网 GIC 峰值可达 90.7 A。从计算结果可以看出,当采用 IEC 提出的  $E_3$  感应电场时,与分层大地电导率模型相比,接触网 GIC 计算值往往较高,为一种极端情况,可能与实际情况不符。

铁路牵引供电系统 GIC 计算涉及多个参数,当仅考虑  $E_3$  感应电场方向与铁路走向夹角  $\theta$  对 GIC 计算结果的影响时,假设电力机车处于供电分区末尾处,采用分层大地电导率模型,当  $\theta$  为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  时计算结果如图 8(a) 所示。

仅考虑电力机车行驶距离  $D$  对 GIC 计算结果的影响时,  $E_3$  感应电场方向与铁路走向平行 ( $\theta=0^\circ$ ),采用分层大地电导率模型。当电力机车处于 5, 15, 25 km 时计算结果如图 8(b) 所示。

上述 GIC 计算结果如表 2 所示。由表 2 可知, GIC 计算结果随着  $\theta$  的增加而减小,  $\theta=0^\circ$  时最大,  $\theta=90^\circ$  时最小。GIC 计算结果随着电力机车行驶距离  $D$  的增加而增加,在  $D=25$  km 时最大,但 GIC 增长率随着  $D$  的增加而减小。

直接供电方式下,单线铁路的牵引变压器一般采用单相变压器。文献 [21] 指出,单相变压器每项绕组的直流耐受值  $I_{dc\max}$  为额定电流  $I_E$  的 0.3%,即

$$I_{dc\max} = 0.3\%I_E = 0.3\%\frac{P_E}{U_E} \quad (10)$$

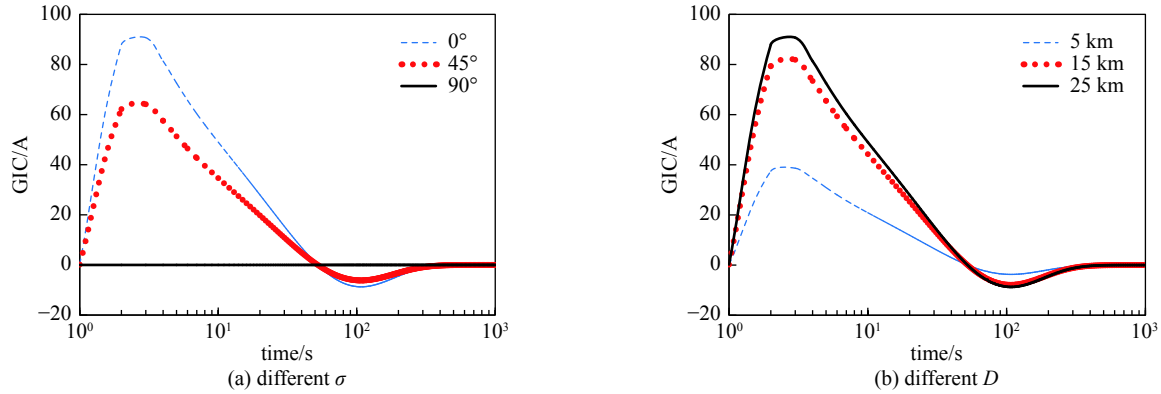


Fig. 8 Geodetic conductivity model and catenary GIC calculation results

图8 接触网 GIC 计算结果

表 2 带回流线的直接供电方式牵引供电系统 GIC 计算结果

Table 2 GIC calculation results of traction power supply system with return Line

variable parameter	parameter value	GIC ( $I_{jc}$ ) minimum and maximum value/A
$\theta$	0°	[-8.73, 90.7]
	45°	[-6.17, 64.13]
	90°	0
$D$	5 km	[-3.72, 38.64]
	15 km	[-7.88, 81.89]
	25 km	[-8.73, 90.7]

式中:  $P_E$  为变压器的额定功率,  $U_E$  为变压器的额定电压。

根据式(10)与表1, 牵引变压器与车载变压器的直流耐受值分别为 4.36 A 与 0.57 A。根据表2, 当出现  $E_3$  感应电场方向与铁路走向平行( $\theta=0^\circ$ ), 且电力机车处于供电分区末尾处的情况时, 接触网中的 GIC 最高可达 90.7A, 该计算结果远大于牵引变压器、车载变压器的直流耐受能力。结合文献[3], 得出初步结论:  $E_3$  可能会使牵引供电系统中的牵引变压器、车载变压器直流偏磁, 产生如振动与噪声增大、温升增加等不利现象, 危及该供电区段内铁路的正常运行, 影响行车安全。

## 4 结论

(1) 平面波理论中主要采用均匀、分层大地电导率模型进行相关效应计算。当采用 IEC 提出的  $E_3$  感应电场时, 与分层大地电导率模型相比, 接触网 GIC 计算值往往较高, 为一种极端情况, 可能与实际情况不符。

(2) 在带回流线的直接供电方式牵引供电系统算例 GIC 计算结果中, 当考虑  $E_3$  感应电场方向与铁路走向夹角  $\theta$  为变量时, GIC 随着  $\theta$  的增加而减小,  $\theta=0^\circ$  时最大,  $\theta=90^\circ$  时最小; 当考虑不同电力机车位置  $D$  为变量时, GIC 随着电力机车行驶距离  $D$  的增加而增加, 在  $D=25$  km 时最大, 但 GIC 增长率随着  $D$  的增加而减小。

(3) 在带回流线的直接供电方式牵引供电系统算例 GIC 计算结果中, 当采用分层大地电导率模型, 且  $E_3$  感应电场方向与铁路走向夹角为 0, 电力机车行驶于供电臂末尾处时, 接触网中的 GIC 最高可达 90.7 A, 该计算结果超过牵引变压器直流耐受能力 20 倍以上, 超过车载变压器直流耐受能力 159 倍以上, 可能会引起牵引变压器、车载变压器直流偏磁, 产生如振动与噪声增大、温升增加等不利现象, 危及该供电区段内铁路的正常运行, 影响行车安全。

## 参考文献:

- [1] IEC 61000-2-9, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2: environment—section 9: description of HEMP environment—radiated disturbance[S].
- [2] Gilbert J, Radasky W A, Smith K S, et al. HEMP TAPS/HEMP-PC audit report[R]. Meta R-131, 1999; DTRA-TR-00-1, 2002.
- [3] 邢军强, 王菲, 韩刚, 等. 大地直流偏磁影响下电力变压器损耗及温升计算研究[J]. 电气技术, 2020, 21(1): 20-24, 30. (Xing Junqiang, Wang Fei, Han Gang, et al. Research on loss and temperature rise calculation method of power transformer under the influence of geomagnetically induced current[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 21(1): 20-24, 30)
- [4] 师泯夏, 吴邦, 靳宇晖, 等. 直流偏磁对变压器影响研究综述[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 20-36, 43. (Shi Minxia, Wu Bang, Jin Yuhui, et al. Research

- summary on the impacts of DC magnetic bias on transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(7): 20-36, 43)
- [5] Gilbert J, Kappenman J, Radasky W, et al. The late-time (E3) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the U. S. power grid[R]. Goleta: Oak Ridge National Laboratory, 2010.
- [6] Hutchins T. Modeling, simulation, and mitigation of the impacts of the late time (E3) high-altitude electromagnetic pulse on power systems[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.
- [7] Lee R H W, Shetye K S, Birchfield A B, et al. Using detailed ground modeling to evaluate electric grid impacts of late-time high-altitude electromagnetic pulses (E3 HEMP)[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1549-1557.
- [8] 余同彬, 周璧华. HEMP作用下近地有限长电缆外皮感应电流研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, 3(1): 8-12. (Yu Tongbin, Zhou Bihua. Study of HEMP induced current in cables with finite length near the ground[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2002, 3(1): 8-12)
- [9] 赵志斌, 柯俊吉, 马丽斌. 高空核电磁脉冲晚期效应对电网稳定性影响的研究[J]. *电气技术*, 2015, 16(9): 16-19. (Zhao Zhibin, Ke Junji, Ma Libin. Research on impact of late-time HEMP to stability of power grids[J]. *Electrical Engineering*, 2015, 16(9): 16-19)
- [10] 陈宇浩, 谢彦召, 刘民周, 等. 高空电磁脉冲作用下电力系统主要效应模式分析[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 070007. (Chen Yuhao, Xie Yanzhao, Liu Minzhou, et al. Analysis of high-altitude electromagnetic effect models on power system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 070007)
- [11] Ngwira C M, Pulkkinen A, McKinnell L A, et al. Improved modeling of geomagnetically induced currents in the South African power network[J]. *Space Weather*, 2008, 6: S11004.
- [12] 章鑫, 杜学彬, 刘君. 华北地区地电暴时GIC及涡旋电流响应分析[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(5): 1800-1810. (Zhang Xin, Du Xuebin, Liu Jun. Analysis of GIC and vortex current responses in Huabei region during geoelectric storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(5): 1800-1810)
- [13] 李功新, 王倩, 刘连光. 输电线路地磁感应电流常用算法分析与研究[J]. *现代电力*, 2005, 22(5): 42-46. (Li Gongxin, Wang Qian, Liu Lianguang. Analysis and study of common algorithms for geomagnetic inductive current in grid[J]. *Modern Electric Power*, 2005, 22(5): 42-46)
- [14] Wait J R. Wave propagation theory[M]. New York: Pergamon, 1981.
- [15] Chew W C. Waves and fields in inhomogeneous media[M]. New York: IEEE Press, 1995.
- [16] Overbye T J, Shetye K S, Hutchins T R, et al. Power grid sensitivity analysis of geomagnetically induced currents[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4821-4828.
- [17] TB 10009-2016, 铁路电力牵引供电设计规范[S]. (TB 10009-2016, Code for design of railway traction power supply[S].)
- [18] 周游. 不同强度地磁暴对高铁牵引网影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016. (Zhou You. Research on the effects of different intensities geomagnetic storms affecting high-speed railway traction network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.)
- [19] 马骋原. 强磁暴侵害高铁电气一次系统的建模方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015. (Ma Chengyuan. Research on modeling method of strong geomagnetic storm impacting on high-speed rail electrical primary system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.)
- [20] 曹源. 用于电网GIC计算的大地电阻率模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010. (Cao Yuan. Earth resistivity modeling method for the evaluation of Geomagnetically Induced Current in power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.)
- [21] DL/T 437-2012, 高压直流接地极技术导则[S]. (DL/T 437-2012, Technical guide of HVDC earth electrode system[S].)