

[文章编号] 1003—4684(2022)02-0044-04

影响地回流因素及其抑制方法分析

周子梁^{1,2}, 汪繁荣¹

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068; 2 湖北水利水电职业技术学院, 湖北 武汉 430070)

[摘 要] 为了有效减小地回流以降低其对牵引变电所的影响, 建立了铁路牵引供电系统仿真模型, 并基于此模型对影响地回流与轨回流比重的因素进行了分析。结果表明: 地/轨回流比值随着机车与牵引变电站距离的增大而增大, 随着牵引变电所接地电阻的减小而减小, 随着道床电阻率的增大而减小。基于此, 设计了 2 种减小地回流的方法, 第一种方法为在距离牵引变电所最近的吸上线处对钢轨进行接地, 其结果表明, 当接地电阻为 $0.88\ \Omega$ 时, 相对于不进行接地时地回流减小了 58 A, 降低地回流效率达到了 25.3%; 第二种方法为分别在 $0\sim 1000\text{ m}$ 、 $-1000\sim 1000\text{ m}$ 、 $0\sim 2000\text{ m}$ 处在钢轨两侧添加贯通地线, 其结果表明在 $0\sim 2000\text{ m}$ 处添加效果最优。

[关键词] 铁路牵引供电系统; 地回流; 轨回流

[中图分类号] U223.1 **[文献标识码]** A

随着高速、重载铁路的发展, 机车速度不断提高, 牵引电流也随之增大, 即使地回流占总牵引回流的比重低于架空线回流, 但仍然成为了铁路牵引供电系统中牵引电流不可忽视的部分^[1-3]。长期地网回流过大还会导致地网电化学腐蚀加快; 变电所地网回流比例过小, 可能存在变电所接地电阻过大的情况; 贯通地线回流比例过大, 会使变电所附近的弱电设备的地电位有较大波动, 产生地电位差, 使通信信号设备的运行可靠性和稳定性降低, 在雷击或者接触网短路情况下, 可能会导致贯通地线烧毁。因此, 有必要对地回流和整体牵引电流之间的关系以及比重进行分析^[4], 探究不同因素对地回流的影响, 为减小地回流、保证牵引供电系统的安全。

1 基于 CDEGS 建立仿真模型

本文所探讨的牵引电流为工频 50 Hz 下的交流电流, 因此可利用 CDEGS 软件中的输入模块 HIFREQ 进行仿真建模以及设定参数。

由于直供加回流线方式下的铁路牵引供电系统是采用工频激励, 可以采用 CDEGS 中的输入模块的 HIFREQ 进行仿真建模。

HIFREQ 模块内设 3 个部分: 计算、土壤类型、系统设置。

1) 系统的频率设置是通过 MALZ 以及 HIFREQ 模块内设的计算模块完成的, 由于铁路牵引供电系统是采用工频激励, 因此需要将起始频率和

基频均调为 50 Hz。

2) MALZ 以及 HIFREQ 模块内设的土壤类型模块可进行土壤电阻率分层设置, 由于实际情况中土壤存在分层问题, 不同厚度下土壤的电阻率存在差异, 因此可通过土壤类型模块灵活设置土壤分层, 选择好土壤分层类型后, 只需在土壤特性网格内填入不同土壤层的相应参数, 所需填写参数包括土壤电阻率、土壤层厚度、相对磁导率以及相对介电常数。

3) 构建铁路牵引供电系统的模型需要在 HIFREQ 模块内设的系统设置模块进行设置。由于不同的导体类型具有不同的导体参数, 因此在建模前首先需要确定模型中存在哪些不同类型的导体, 并在导体类型中进行设置。

1.1 铁路牵引供电仿真模型的建立

根据上文介绍的建模方法及步骤, 完成了在 CDEGS 仿真软件 HIFREQ 模块中对铁路牵引供电模型的建立, 在仿真模型中共设有 2 根长度为 50 km 的水平钢轨; 回流线设置在钢轨上方 8 m 处, 长度与钢轨相同; 共设置了 19 根吸上线, 吸上线将一侧钢轨与回流线相连, 使回流线与钢轨并联; 通过在牵引站 A 及牵引站 B 处设置接地电阻为 $0.44\ \Omega$ 的地网来等效牵引站的引流; 将牵引变压器等效成 27.5 kV 的交流电压源; 牵引站 A 及牵引站 B 地网与轨道回流系统通过回流线相连; 仿真模型中总共分为 2 层, 第一层为钢轨和大地之间的道床层, 由于

[收稿日期] 2021-09-17

[第一作者] 周子梁(1992—), 男, 湖北天门人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为电网与智能制造

[通信作者] 汪繁荣(1979—), 男, 湖北天门人, 湖北工业大学副教授, 研究方向为电网与智能制造

道床层相对复杂,包括绝缘板、道枕、碎石,因此通过均匀电阻率来等效道床层,可通过设置等效电阻率来解决,厚度为 0.9 m;第二层为土壤层。仿真模型见图 1,仿真模型示意图见图 2。仿真模型中的吸上线坐标见表 1 所示,牵引站 A 的位置设置在 x 坐标为 0 处。

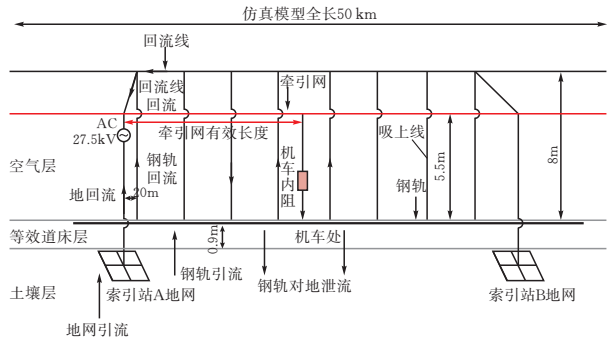


图 1 铁路牵引供电仿真模型

表 1 铁路牵引供电模型吸上线坐标

起点			终点		
x	y	z	x	y	z
-12027	-0.7175	0.014	-12027	-2	-8
-8059	-0.7175	0.014	-8059	-2	-8
-4027	-0.7175	0.014	-4027	-2	-8
-2059	-0.7175	0.014	-2059	-2	-8
20	-0.7175	0.014	20	-2	-8
1006	-0.7175	0.014	1006	-2	-8
2801	-0.7175	0.014	2801	-2	-8
4817	-0.7175	0.014	4817	-2	-8
7892	-0.7175	0.014	7892	-2	-8
10333	-0.7175	0.014	10333	-2	-8
12932	-0.7175	0.014	12032	-2	-8
14521	-0.7175	0.014	14521	-2	-8
15734	-0.7175	0.014	15734	-2	-8
17928	-0.7175	0.014	17928	-2	-8
20475	-0.7175	0.014	20475	-2	-8
22956	-0.7175	0.014	22956	-2	-8
25565	-0.7175	0.014	25565	-2	-8
28125	-0.7175	0.014	28125	-2	-8
30385	-0.7175	0.014	30385	-2	-8
33287	-0.7175	0.014	33287	-2	-8
35680	-0.7175	0.014	35680	-2	-8

1.2 参数的选择

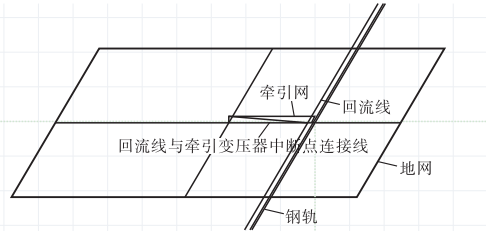
铁路牵引供电系统中各参数见表 2 和表 3,基于 CDEGS 仿真模型截图见图 2。第 2 节中的仿真参数若无特别说明,均以表 2 和表 3 中参数为准。

表 2 铁路牵引供电模型土壤分层参数

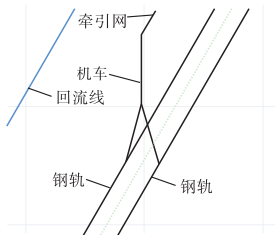
分层	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	厚度/m
道床层	62000	0.9
土壤层	200	∞

表 3 导体参数

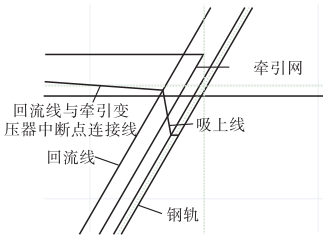
导体类型	交流电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	导体半径/mm
钢轨	1.1	12.8
回流线	0.7	6.9
吸上线	0.1803/直流电阻	7.6
接触网	0.1181/直流电阻	27.5



(a)牵引变电站仿真



(b)机车处仿真



(c)牵引变电所附近钢轨处

图 2 铁路供电仿真模型中部分区域示意图

2 影响地回流与轨回流分配的因素

根据图 1 可知,牵引电流回流牵引变电所变压器中性点的路径主要包括牵引电流从钢轨与回流线回流,以及从牵引变电所的地网处回流,因此,本文将牵引电流从钢轨与回流线回流牵引变电所命名为轨回流,从牵引变电所地网处回流命名为地回流。

由于轨回流过大会提升钢轨对地电位,而地回流过大会加速地网接地极的腐蚀,同时还会干扰周围的信号设备,因此有必要对影响地回流与轨回流的比重因素进行探究,并分析地回流与轨回流比重对钢轨对地电位的影响。

2.1 机车与牵引变电所的距离对地回流与轨回流分配的影响

为了探究机车与牵引变电所的距离对地回流与轨回流分配的影响,总共设置了 6 种机车与牵引变电所的距离,机车位置分别在 3 200 m、4 800 m、6 300 m、7 750 m、9 300m、13 700 m、16 800 m、

19 000 m 处。

由图 3、图 4 可知,地回流随着机车与牵引变电所的距离增大而增大,轨回流随着机车与牵引变电所距离的增大而减小,但随着机车与牵引变电所距离的进一步增大,地回流的增大幅度 and 轨回流的减小幅度都在收敛,最终趋于饱和。因此,机车与牵引变电所距离大于 7 500 m 时,地回流以及牵引变压器中性点对地电位均处于相对较高的水平。

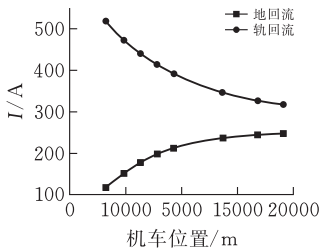


图 3 不同机车位置条件下地轨回流分布

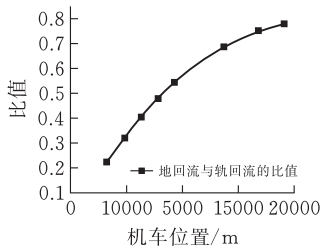


图 4 不同机车位置条件下地轨回流比值

2.2 钢轨对地泄流能力对地回流与轨回流分配的影响

为了探究钢轨对地泄流对地回流与轨回流比重的影响,总共设置了 6 种道床层电阻率,分别为 $3000\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $6000\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $12\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $24\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $36\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 、 $50\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,并对 6 种不同道床层电阻率条件的模型进行了仿真,结果见图 5。

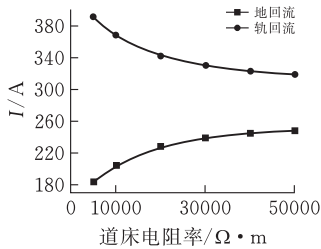


图 5 不同道床电阻率条件下地轨回流分布

由图 5 知:地回流随着道床电阻率的增大而增大,轨回流随着道床电阻率的增大而减小,但随着机车与牵引变电所距离的进一步增大,地回流的增大幅度和轨回流的减小幅度都在收敛,最终趋于饱和。

2.3 牵引变电所地网电阻对地回流与轨回流分配的影响

由于牵引变电所接地电阻的增大会导致地回流困难,同时会使牵引变压器中性点对地电位升高,为

了探究牵引站地网接地电阻对地回流与轨回流比重的影响,分别将牵引变电所地网电阻设为 $0.6\ \Omega$ 、 $0.8\ \Omega$ 、 $1.5\ \Omega$ 、 $2.3\ \Omega$ 、 $2.8\ \Omega$ 、 $3.5\ \Omega$,道床层电阻率取 $50\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,土壤层电阻率取 $200\ \Omega\cdot\text{m}$,机车位置设置在 8 000 m 处。

由图 6 知:地回流随着牵引变电所地网电阻的增大而减小,轨回流随着牵引变电所地网电阻的增大而增大,但随着机车与牵引变电所距离的进一步增大,地回流的增大幅度和轨回流的减小幅度都在收敛,最终趋于饱和。

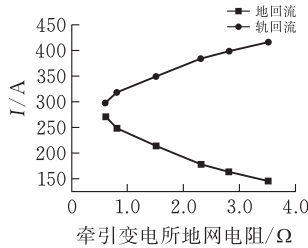
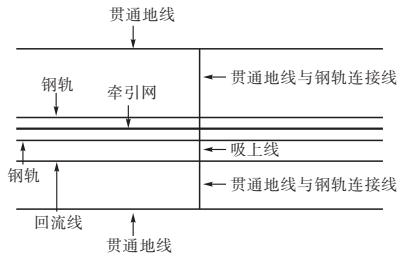


图 6 不同牵引变电所地网电阻条件下地轨回流分布

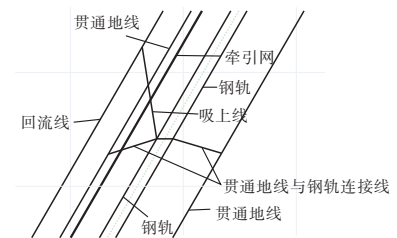
2.4 减小地回流方法的提出和仿真实验

为了减小大地的杂散电流从牵引变电所地网回流牵引变压器,可对牵引变电所附近的钢轨进行接地以减小地回流,由于钢轨电流最终通过离牵引变电所最近的吸上线处回流牵引变电所,因此在离牵引变电所最近的吸上线处对钢轨进行接地,能够将大地的杂散电流更快地引入吸上线。

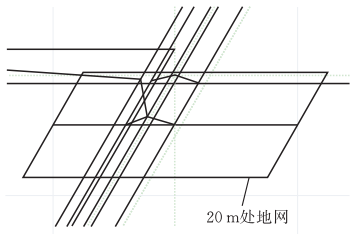
为此,在 x 坐标为 20 m 的吸上线处敷设地网进行引流,将地网电阻分别设为 $1\ \Omega$ 、 $2\ \Omega$ 、 $3\ \Omega$ 、 $4\ \Omega$,土壤电阻率取 $200\ \Omega\cdot\text{m}$,牵引电流取 590 A,机车位置距牵引变电所 16 800 m,吸上线处的仿真模型见图 7。计算结果见表 4。



(a)添加贯通地线处铁路供电模型俯视图



(b)添加贯通地线处铁路供电模型侧视图



(c)添加贯通地线处铁路供电模型地网示意图
图 7 添加贯通地线的铁路供电模型示意图

表 4 牵引站附近钢轨处接不同大小地网时
地回流与轨回流的数值变化

地网大小/ Ω	地回流/A	轨回流/A
0.88	171	416
2.05	201	387
3.35	215	374
4.95	220	370
不接地	229	361

由表 4 可知,在距离牵引变电所最近的吸上线处对钢轨进行接地能够有效降低地回流,当接地电阻为 $0.88\ \Omega$ 时,相对于不进行接地时地回流减小了 $58\ \text{A}$,降低地回流效率达到了 25.3% ,效果明显,但当接地电阻为 $4.95\ \Omega$ 时,相对于不进行接地时地回流仅减小了 $9\ \text{A}$,降低地回流效率仅为 3.9% ,若接地电阻值继续增大,在距离牵引变电所最近的吸上线处对钢轨进行接地对降低地回流的效果可以忽略。

同时,由于距离牵引变电所最近的吸上线处对

钢轨电位与牵引变电所变压器中性点电位接近,因此,地回流的减小能够有效降低牵引变电所变压器中性点电位,从而降低了距离牵引变电所最近的吸上线处钢轨电位。

3 结论

通过仿真分析,得到了不同因素影响地轨回流比重的规律:1)机车与牵引变电所距离的增大,以及道床电阻率的增大,均会使地回流在总回流中的占比上升;相反,牵引变电所地网电阻的增大会使地回流的占比降低。2)通过分析得出上述规律,提出了减小地回流的方法,该方法通过在牵引变电所附近的钢轨进行接地,能够有效地降低地回流,增大轨回流,最后通过 CDEGS 软件对所提出的方法进行了仿真,验证了该方法的有效性。

[参 考 文 献]

[1] 雷栋. 高速电气化铁路牵引回流及钢轨电位特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
[2] 王潇. 高速铁路牵引网回流接地系统对钢轨电位影响的研究[D].成都: 西南交通大学, 2008.
[3] 王欢. 牵引供电系统地回流分析及接地网交流电腐蚀问题研究[D]. 北京:北京交通大学.
[4] 李天石,李明祥,霍斌.高速铁路变电所牵引电流回流指标研究[J].中国铁路,2017(2):21-25.

Analysis of Factors Affecting the Distribution of Ground
Return Flow and Its Suppression Method

ZHOU Zishuo^{1,2}, WANG Fanrong¹

(1 School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech, Wuhan 430068, China;
2 Hubei Water Conservancy & Hydropower Polytechnic, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to effectively reduce the ground return flow and its impact on the traction substation, a simulation model of the railway traction power supply system is established. Based on this model, the factors affecting the proportion of ground return flow and rail return flow are analyzed. The results show that the ground/rail return ratio increases as the distance between the locomotive and the traction substation increases, decreases as the ground resistance of the traction substation decreases, and decreases as the resistivity of the track bed increases. Based on this, two methods to reduce ground return are designed. The first method is to ground the rail at the suction line closest to the traction substation. The results show that when the ground resistance is $0.88\ \Omega$, it is When grounding, the ground return has been reduced by $58\ \text{A}$, and the efficiency of ground return has been reduced by 25.3% ; the second method is to add through ground wires on both sides of the rail at $0\sim1000\ \text{m}$, $1000\sim1000\ \text{m}$, and $0\sim2000\ \text{m}$ respectively. As a result, it shows that the effect of adding at $0\sim2000\text{m}$ is the best.

Keywords: railway traction power supply system; ground return; rail return

[责任编辑: 张岩芳]