

轨地过渡电阻对电网地铁杂散电流分布影响分析

罗远国¹,刘君²,毛钧毅¹,荣娜¹,王乃进³

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 3. 贵州电网有限责任公司安顺供电局, 贵州 安顺 562400)

Analysis of the Influence of Rail-to-Ground Resistance on the Stray Current Distribution in a Power Grid

LUO Yuanguo¹, LIU Jun², MAO Junyi¹, RONG Na¹, WANG Naijin³

(1. Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Electric Power Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China; 3. Anshun Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Anshun 562400, Guizhou, China)

ABSTRACT: To research the influence of the rail-to-ground resistance on the subway stray current distribution in the AC power grid, this paper proposes a coupled simulation model for the stray current of subway and AC power system under the multi-layer zoned soil, and a simulation model for AC power grid. First, it builds a multi-layer zoned soil model based on the measured soil data, and establishes a coupled model of a subway line and a district power grid in Guiyang using CDEGS software. Second, the influence of the rail-to-ground resistance on the distribution of subway stray current and the direct current at neutral point of the grounding transformer is analyzed with the trains operating conditions of the subway considered at the same time. Finally, according to the actual electrical parameters, the external DC power input is set by the simulation results for the neutral point DC of grounding transformer in the coupled model. The simulation model of stray current distribution in the power grid in a certain area of Guiyang is further obtained with the help of PSCAD/EMTDC software. The results show that the reduction of the rail-to-ground resistance will cause the increase of the neutral point DC of grounding transformer, the stray current in the transmission line and the excitation winding of transformer.

KEY WORDS: rail-to-ground resistance; multi-layer zoned

soil; stray current; CDEGS; AC power grid; PSCAD/EMTDC

摘要: 为研究轨地过渡电阻对电网中地铁杂散电流分布的影响,提出了在多层分区土壤下地铁与电网的杂散电流耦合模型以及交流电网模型。首先,基于实测土壤数据建立多层分区土壤模型,通过 CDEGS 软件建立贵阳市某地铁线路和片区电网耦合模型。然后,在考虑地铁列车运行工况的同时,仿真分析了轨地过渡电阻变化对地铁杂散电流和变压器中性点直流电流分布的影响。最后,结合实际电网参数,根据所提耦合模型变压器中性点流入电流的仿真结果设置外部直流电源输入,进而借助 PSCAD/EMTDC 软件构建贵阳市某片区电网杂散电流分布模型。仿真结果表明,轨地过渡电阻减小会增大变压器中性点、输电线路以及变压器励磁绕组中的杂散电流。**关键词:** 轨地过渡电阻;多层分区土壤;地铁杂散电流;CDEGS;交流电网;PSCAD/EMTDC

随着现代城市轨道交通的快速发展^[1],直流地铁系统逐渐网络化和密集化,地铁杂散电流给交流电网带来的问题日益增加^[2-4]。地铁运行产生的杂散电流侵入中性点接地的变压器后,会导致其发生直流偏磁现象,出现异常振动噪声以及励磁电流严重畸变等问题^[5-7]。而地铁钢轨对地的过渡电阻是影响地铁杂散电流的主要因素之一^[8-10]。因此,研究轨地过渡电阻变化对杂散电流在电网中分布的影响,对变压器直流偏磁的防护与治理具有重要意义。

近年来,已有学者对城轨杂散电流的分布及其影响因素进行了深入研究。从影响地铁杂散电流分布研究角度出发,文献[8]利用 CDEGS 软件建立了

基金项目:贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1100);南方电网公司科技项目(GZKJXM20182480)。

Project Supported by the Science and Technology Foundation of Guizhou Province(Guizhou Science and Technology Foundation [2019] 1100); the Science and Technology Program of the CSG (GZKJXM20182480).

地铁杂散电流仿真模型,仿真分析了轨地过渡电阻对杂散电流分布的影响;文献[9]考虑轨地过渡电阻的主要影响因素,建立了城轨杂散电流模型,并分析了钢轨紧固系统故障对地铁杂散电流的影响;文献[11]基于CDEGS软件提出了一种长线路城轨杂散电流仿真建模方法,分析了局部绝缘破坏对杂散电流分布的影响;文献[12]详细地考虑了列车运行工况,建立了评估城轨杂散电流的综合模型。上述文献研究了不同因素对地铁杂散电流分布的影响,但未涉及地铁杂散电流在电网中的分布影响。因此,有必要建立地铁与电网的耦合模型,进一步探究地铁杂散电流对交流电网的影响。从电网中地铁杂散电流分布模型研究角度出发,文献[13]提出了直流地铁系统和交流电力系统的耦合模型,考虑了列车运行工况对交流电网直流电流分布的影响,但该模型未考虑实际土壤电阻率;文献[14]考虑实际土壤结构,建立了地铁杂散电流模型以及电网模型,研究了地铁密集度和土壤电阻率对变压器中性点的直流电流和地电位的影响,但该模型未详尽考虑列车运行工况;文献[15]使用PSCAD软件,建立了交流电网杂散电流分布仿真模型,分析了变压器漏抗和大地电阻等对电网中杂散电流分布的影响,但该模型只考虑了地铁早发车时段的杂散电流。上述文献均未考虑轨地过渡电阻因素对电网中地铁杂散电流的分布情况进行分析。

因此,为研究轨地过渡电阻对地铁杂散电流在地铁沿线及交流电网中分布的影响,本文利用CDEGS软件,提出了多层分区土壤下贵阳市某地铁线路和某片区电网杂散电流的耦合模型,分析了轨地过渡电阻变化对杂散电流分布的影响。进一步地,在PSCAD软件中建立了贵阳市某片区的电网模型,依据耦合模型计算得到的变压器中性点直流电流设置外部直流源,模拟杂散电流侵入交流电网,计算分析了不同轨地过渡电阻下输电线路和变压器励磁绕组中的地铁杂散电流分布。

1 地铁与电网杂散电流模型构建

1.1 地铁杂散电流的产生和传播

地铁采用直流牵引系统对列车进行供电^[16-17],列车集电弓从接触网取电,电流通过车轮钢轨返回变电所负极实现回流^[18]。由于技术和运行环境等原

因,钢轨与大地间无法完全绝缘,地铁列车运行时,电流通过钢轨泄漏进入大地产生直流杂散电流,通过大地入侵中性点接地的变压器。此外,杂散电流还会流入地铁35 kV牵引变的接地系统,通过35 kV电缆金属屏蔽层进入110 kV主所接地网,并通过地线入侵220 kV和500 kV变电站接地网^[13],进而流入中性点接地的变压器。图1所示为地铁杂散电流侵入电网示意图。

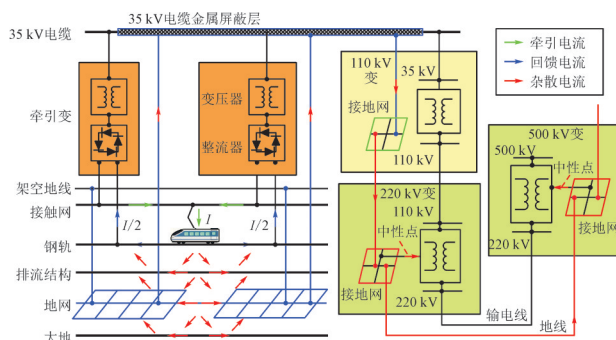


图1 地铁杂散电流侵入电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of subway stray current intruding into AC power grid

1.2 地铁导体等效建模方法

地铁单向隧道四层地网结构模型如图2所示。该结构中包含钢轨、排流结构、地网三层导体和大地土壤^[19],且每层纵向导体间存在横向连接。

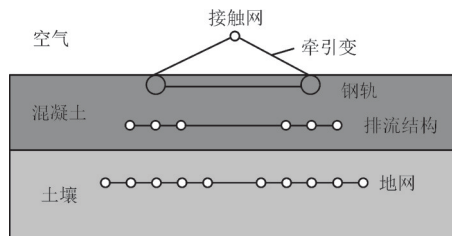


图2 单向四层地网结构

Fig.2 The network structure of the unidirectional four-layer conductor

地铁通常为上下行双向隧道,两条隧道同层导体间存在横向连接。由于CDEGS软件本身存在导体数和导体分段节点数限制,若采用传统四层地网结构建立双向长线路城市轨道交通模型,纵向导体数量过大则会超过导体数目限制。并且因分段节点数限制,纵向导体过多会使导体分段间距增大,计算结果精度降低。因此,将同一层的多根纵向导体等效为一根导体,进而建立地铁直流杂散电流分布模型,以保证计算结果的精度^[11]。等效导体单位长度电阻和半径换算关系如式(1)和式(2)所示。

$$R_{eqi} = \frac{R_i}{n_i}, \quad r_{eqi} = n_i r_i \quad (1)$$

式中: R_i 、 R_{eqi} 分别为单根导体*i*及其等效导体的单位长度电阻; r_i 、 r_{eqi} 分别为单根导体*i*及其等效导体的半径; n_i 为单向隧道内导体*i*的数量。轨地过渡电阻计算公式如式(2)所示。

$$\rho_g = \frac{2\pi R_g (r + h/2)L}{h} \quad (2)$$

式中: ρ_g 为模型中钢轨涂层电阻率; R_g 为轨地过渡电阻; h 为纵向钢轨涂层厚度; L 为线路长度; r 为纵向钢轨导体半径。通过式(1)至式(2)的等效转换,地铁等效导体网络模型如图3所示。

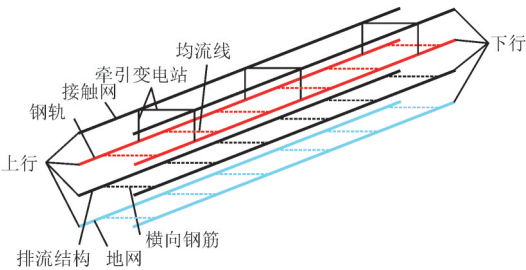


图3 等效导体网络模型

Fig.3 Equivalent conductor network model

1.3 地铁与电网杂散电流耦合模型的构建

1.3.1 导体模型

贵阳市某地铁线路共25个车站,其中11个车站设有牵引变电站,线路长度为35.1 km。根据式(1),将供电和回流系统设备依据其参数进行等效,得到表1所示参数。上下行两线路每隔1 000 m设置均流线及横向钢筋连接,上下行钢轨间距设置为5.1 m。根据式(2),由实际轨地过渡电阻计算得到钢轨涂层电阻率为450 Ω·km。此外,通过改变钢轨涂层电阻率可实现轨地过渡电阻的变化^[8],本文设置另两种钢轨涂层电阻率45、200 Ω·km进行对比分析。

表1 地铁导体等效参数

Table 1 Equivalent parameters of the subway conductor

结构	半径/m	电阻/(Ω·km ⁻¹)
接触网	0.009	0.008
钢轨	0.098	0.02
排流网	0.057 6	0.031 7
地网	0.049	0.09

杂散电流耦合模型的交流电网部分主要考虑了贵阳市受直流杂散电流影响较大,变压器直流偏磁现象较为严重的变电站所组成的片区电网。该片区电网中包含1个500 kV变电站S500,5个220 kV

变电站S1~S5,耦合模型交流网部分相应导体的参数设置如表2所示^[20~21]。

表2 交流网导体参数

Table 2 Conductor parameters of the AC power grid

结构	电阻/(Ω·km ⁻¹)
500 kV 变压器	1
220 kV 变压器	2
220 kV 输电线	0.03
35 kV 电缆屏蔽层	0.34
地线	0.5
接地网	2

1.3.2 土壤模型

地铁隧道为钢筋混凝土结构^[22],如图2所示。牵引供电系统处于空气中,在模型中的接触网和牵引变电站导体表面设置完全绝缘的涂层。贵阳市土壤结构错综复杂,难以建立准确的土壤模型。因此,选取贵阳市区受直流偏磁影响较重的变电站,对其附近区域土壤进行了勘测。进而以实际土壤电阻率数据为依据建立多层分区土壤模型,模拟该地区的土壤结构。土壤电阻率测量结果如表3所示。

表3 土壤电阻率测量结果

Table 3 Soil resistivity measurement results Ω·m

深度/m	S1	S2	S5	S500
3	52.27	23.22	39.7	47.4
5	52.02	10.74	41.65	88.5
9	52.52	9.04	40.52	138.5

根据表3的测量数据,建立4个分区的土壤模型。其中分区2和分区4的土壤设置为3层;分区1和分区3的土壤设置为1层,电阻率分别为52.52 Ω·m和40.52 Ω·m。并将4个分区外的土壤电阻率设置为100 Ω·m,混凝土结构的电阻率设置为180 Ω·m^[23],空气的电阻率设置为1×10¹⁸ Ω·m。

综上所述,考虑该地铁线路和片区变电站的地理位置及拓扑结构,在CDEGS的MALZ模块建立多层分区土壤结构下地铁和交流电网杂散电流耦合模型。交流电网导体与地铁导体之间的电气和土壤连接关系如图4所示。

1.4 某片区交流电网模型的构建

利用PSCAD/EMTDC仿真平台,建立与所提耦合模型交流网部分相同的贵阳市某片区交流电网仿真模型,根据实际电网电气设备参数设置模型参数,如表4和5所示。

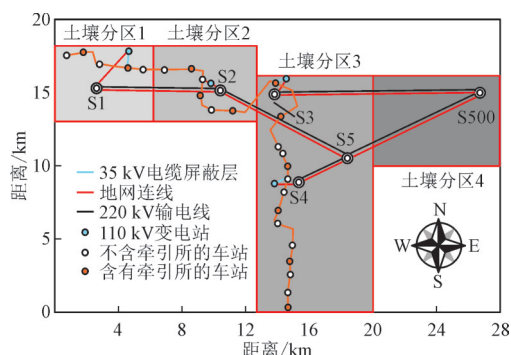


图4 地铁与电网杂散电流耦合模型

Fig.4 The coupled model of the stray current of subway and AC power grid

表4 各变电站接地变压器参数

Table 4 Parameters of grounding transformer in each substation

变电站	额定容量/MV·A	漏抗有名值/ Ω
S1	150	46.82
S2	240	31.77
S3	180	39.39
S4	240	31.97
S5	240	30.13

表5 线路参数

Table 5 The parameters of the conductor

线路	输电线路/ Ω	避雷线/ Ω
S500-S3	$0.98+j6.20$	12.91
S500-S5	$0.86+j5.42$	11.29
S5-S4	$0.20+j0.51$	1.27
S5-S2	$0.40+j2.54$	5.30
S2-S1	$0.42+j2.64$	5.49

为兼顾模型的准确性及计算效率,对模型中除所考虑变电站以外的电网进行等值简化,如图5所示,其中变电站S4已经投入电容隔直装置,同时考虑了避雷线和各变电站间的大地电阻。进一步地,通过在变压器的中性点设置相应的由外部数据控制的直流电源,模拟直流杂散电流侵入交流电网。

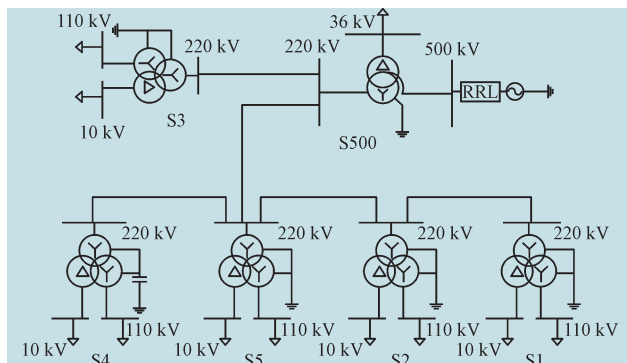


图5 贵阳某片区电网PSCAD仿真模型

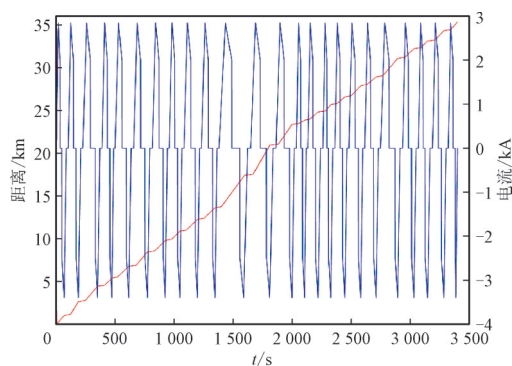
Fig.5 PSCAD simulation model of the AC power grid in a certain area of Guiyang

2 算例分析

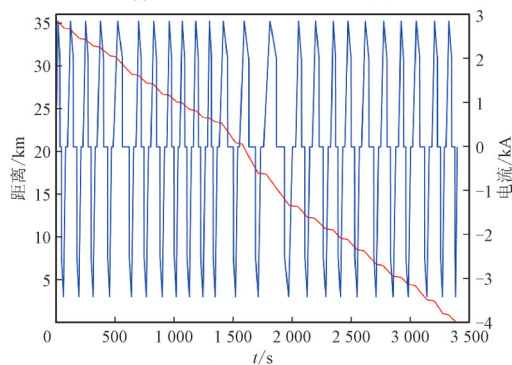
2.1 耦合模型应用分析

2.1.1 仿真工况设置

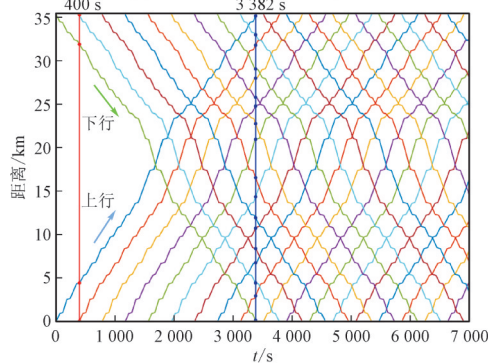
根据所提耦合模型,列车牵引电流和位置如图6所示。其中图6(a)、6(b)表示单辆列车在其出发至到达时间段内,不同时间点对应的列车行驶距离和列车牵引电流,列车牵引电流通过牵引计算法和功率流计算法计算得到^[24]。图6(c)为贵阳地铁某线路的列车运行时刻表,列车首发时间为06:20,采用6分30秒行车间隔,全线共可运行18组列车。



(a) 上行方向单列车位置与牵引电流



(b) 下行方向单列车位置与牵引电流



(c) 贵阳地铁某线路列车时刻表

图6 列车运行图

Fig.6 Train operation diagram

考虑首发车时间后第 400 s 和 3 382 s 两个时间点,分别为工况 1 和工况 2,计算不同轨地过渡电阻下地铁沿线的杂散电流分布情况。工况设置如表 6 所示,机车牵引电流为列车开离始发车站历经的时间在图 6(a)、6(b)所对应的牵引电流值,机车行驶位置如图 6(c)所示。

表 6 地铁杂散电流计算工况表

Table 6 Operation schedule of stray current calculation

仿真工况	时间/s	机车数量/辆
工况 1	400	4
工况 2	3 382	18

同时,在首发时间后第 3 010 s 至 3 400 s,即 7:10:10 至 7:16:40,每 1 秒进行一次仿真,即 390 个工况,计算不同轨地过渡电阻情况下变压器中性点流入的直流杂散电流。

2.1.2 地铁杂散电流

在所提耦合模型中,分别仿真计算工况 1、2 时,3 种不同轨地过渡电阻下,上行方向地铁沿线的钢轨电位和杂散电流分布情况,如图 7 所示。

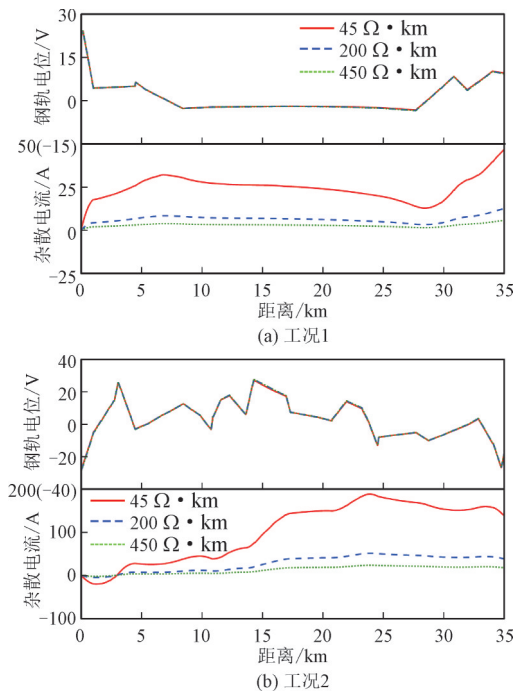


图 7 不同工况下地铁杂散电流计算结果

Fig.7 The calculation results of the subway stray current under different working conditions

观察图 7 可知,轨地过渡电阻的变化对钢轨沿线的电位分布影响微弱,可忽略不计。当钢轨涂层电阻率为 45、200、450 $\Omega \cdot \text{km}$ 时,工况 1 的杂散电流绝对值的幅值分别为 47.33、12.73、5.84 A,工况 2 的

杂散电流绝对值的幅值分别为 188.04、51.21、23.55 A。对比发现,运行列车数量增多和轨地过渡电阻减小,都会导致杂散电流的增大。

2.1.3 变压器中性点直流电流

在所提耦合模型中,仿真计算 3 种不同轨地过渡电阻下,7:10:10 至 7:16:40 共计 390 个时间点的各变电站变压器中性点流入电流,如图 8 所示。

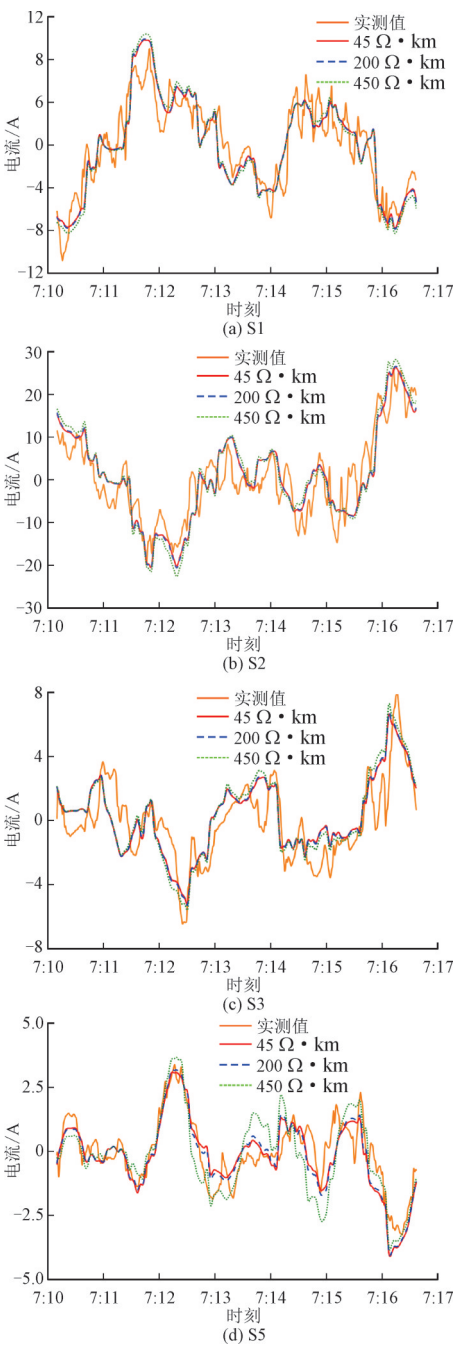


图 8 变压器中性点直流电流

Fig.8 Direct current at neutral point of the grounding transformer

其中,因变电站 S4 已投入电容隔直装置,且 S4 及 S500 无中性点直流电流实测数据,故变电站 S4 及 S500 的流入电流不再进行分析。

通过图 8 可得,仿真时间段内所提耦合模型的变压器中性点直流电流仿真波形与实测波形的趋势基本相同。各变电站变压器在 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 轨地过渡电阻下的中性点流入直流电流的仿真结果与实测值幅值大小的平均误差仅为 11.86%。其中,变电站 S2 变压器的中性点直流电流水平最高,其实测值和 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 过渡电阻下仿真值的幅值分别为 26.03、26.18 A,误差为 0.57%;变电站 S5 变压器的中性点直流电流水平最低,幅值分别为 3.38、4.11 A,误差为 21.3%,过渡电阻对其中性点直流电流的影响最为明显。实际工程中关注的是较大的变压器中性点流入直流电流,较小的直流电流并非治理目标,同时由于现场测量装置存在一定的零漂和表计误差,所以这样的偏差是可以接受的^[25]。因此,通过所提耦合模型的变压器中性点直流电流仿真值与实测值的对比分析,验证了该仿真模型的有效性。

进一步地,根据不同轨地过渡电阻下变压器中性点直流电流仿真结果,计算其绝对值的算术平均值如表 7 所示。

表 7 中性点直流电流绝对值的算术平均值
Table 7 Arithmetic mean of absolute value of the direct current at neutral point A

变电站	$450\ \Omega\cdot\text{km}$	$200\ \Omega\cdot\text{km}$	$45\ \Omega\cdot\text{km}$
S1	3.65	3.69	3.87
S2	8.12	8.23	8.75
S3	1.88	1.92	2.09
S5	1.04	1.05	1.23

观察表 7 可得,变电站 S5 中性点直流电流增加的百分比最大,过渡电阻为 $45\ \Omega\cdot\text{km}$ 时中性点流入电流较 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 增加约 18.79%,升高 195 mA;较 $200\ \Omega\cdot\text{km}$ 增加约 17.73%,升高 185 mA。相比之下,变电站 S2 中性点直流电流增加的数值最大,过渡电阻为 $45\ \Omega\cdot\text{km}$ 时变压器中性点直流电流较 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 升高 622 mA,增加约 7.66%;较 $200\ \Omega\cdot\text{km}$ 升高 515 mA,增加约 6.26%。因此,这说明了变压器中性点直流电流水平较低时,电流的变化百分比更容易受过渡电阻影响;而电流水平较高时过渡电阻对其电流变化的数值影响更大。究其原因,变电站与地铁距离较远且与地铁接地系统的电气距

离较长时,变压器中性点直流电流水平偏低,基数较小。同时,变电站与地铁导体距离较近,且其所处土壤分区的电阻率较小时,其变压器中性点直流电流偏高,易受过渡电阻影响。

2.2 电网模型应用分析

为分析地铁轨地过渡电阻对直流杂散电流在电网中分布的影响,基于所提片区电网仿真模型,利用外部数据控制直流电流源,在 S1、S2、S3、S5 变压器中性点分别注入 CDEGS 耦合模型仿真得到的不同轨地过渡电阻下的直流杂散电流以及实测电流数据,设置仿真时长为 8 min,其中 0~90 s 设置流入电流为 0 A,表示无杂散电流流入。

2.2.1 输电线路直流电流

片区电网模型输电线路中的直流电流仿真结果如附录图 A 所示。对比可知,实测值与所提耦合模型计算值在片区电网模型的仿真波形趋势基本保持一致。其中, $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 过渡电阻下耦合模型的中性点直流电流仿真值注入片区电网模型时,与注入实测值相比,不同输电线路中直流电流分量幅值大小的平均误差为 8%。其中,在实测值和 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 过渡电阻下的仿真结果中,输电线 S5-S2 直流电流幅值均为最大,分别为 9.35、9.63 A,误差为 3.01%;输电线 S5-S4 幅值最小,分别为 2.5、2.22 A,误差为 11.22%。这表明了该片区电网模型的有效性。

进一步地,对 90 s 后的输电线路直流电流分量仿真结果取绝对值的算术平均值,结果如表 8 所示。观察表 8 可知,各输电线路在过渡电阻为 $45\ \Omega\cdot\text{km}$ 时流通的直流电流较 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 平均增加 8.35%,升高 155 mA;较 $200\ \Omega\cdot\text{km}$ 平均增加 6.89%,升高 129 mA。输电线路参数、变压器参数和变电站间距不同,不同输电线路流通的杂散电流也不同。其中输电线 S5-S2 流通的直流电流平均值增加的数值最大,在过渡电阻为 $45\ \Omega\cdot\text{km}$ 时直流电流平均值较 $450\ \Omega\cdot\text{km}$ 增加 275 mA,较 $200\ \Omega\cdot\text{km}$ 增加 230 mA。

表 8 输电线直流电流绝对值的算术平均值
Table 8 Arithmetic mean of absolute values of the direct current of transmission line A

输电线	$450\ \Omega\cdot\text{km}$	$200\ \Omega\cdot\text{km}$	$45\ \Omega\cdot\text{km}$
S500-S3	1.29	1.32	1.43
S500-S5	1.84	1.85	1.93
S5-S4	0.62	0.63	0.67
S5-S2	2.59	2.63	2.86
S2-S1	2.96	3	3.19

2.2.2 变压器励磁电流

变电站 S2 变压器 A 相的励磁电流如图 9 所示。其中图 9(a)为变压器 A 相的励磁电流,图 9(b)为励磁电流的直流分量。由于入侵变压器励磁绕组的直流电流较为微弱,因此不同过渡电阻下的变压器励磁电流无明显变化。提取的励磁电流的直流分量如图 9(b)所示,观察得知,90 s 后的励磁电流在过渡电阻为 $45 \Omega \cdot \text{km}$ 时直流电流分量绝对值的算术平均值较 $450 \Omega \cdot \text{km}$ 增加 6.2%,较 $200 \Omega \cdot \text{km}$ 增加 5.07%。

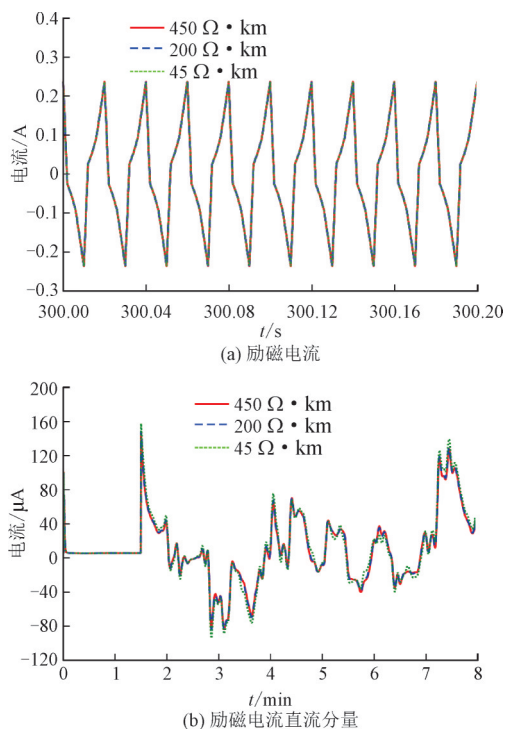


图9 变电站S2变压器励磁电流

Fig.9 Excitation current of the transformer in substation S2

综上所述,随着轨地过渡电阻的减小,地铁沿线杂散电流以及电网中变压器中性点直流电流、输电线路直流电流、变压器励磁电流直流分量等均逐渐升高,其中变电站 S2 变压器中性点直流电流受过渡电阻影响最大。究其原因,由于过渡电阻减小,地铁杂散电流增大,导致地铁沿线及片区电网中分布的杂散电流随之增大,且变压器中性点直流电流的大小与变电站距离地铁的距离、距地铁地网电气距离以及变电站所在的大地电阻率有关。因此,在实际工程中,应将轨地过渡电阻尽可能地提高,在制定变压器直流偏磁抑制措施时,应重点关注离地铁较近及所处地区大地电阻率较小的变电站。

3 结论

本文分别建立了地铁与电网杂散电流耦合模型和片区交流电网模型。借助 CDEGS 和 PSCAD 软件,通过其仿真结果与实测值的对比,验证了所提模型的有效性。进而仿真分析了过渡电阻对电网中地铁杂散电流分布的影响,结论如下:

1) 在地铁与电网耦合模型中,当轨地过渡电阻减小时,变压器中性点流入直流杂散电流将升高。当轨地过渡电阻由 $450 \Omega \cdot \text{km}$ 减小至 $200 \Omega \cdot \text{km}$ 和 $45 \Omega \cdot \text{km}$ 时,变压器中性点直流电流升高的幅度分别为 0.91%~1.85%和 6.15%~18.79%。其中,对于变压器中性点直流电流水平更高的变电站,过渡电阻减小时变压器中性点直流电流增加的数值也更大。

2) 在片区电网模型中,随着轨地过渡电阻的增大,电网中输电线路和变压器励磁绕组等流通的直流杂散电流逐渐降低。例如,轨地过渡电阻由 $45 \Omega \cdot \text{km}$ 分别增加到 $200 \Omega \cdot \text{km}$ 和 $450 \Omega \cdot \text{km}$ 时,输电线路中流通的直流电流分别降低 4.17%~8.73%和 5.01%~10.67%,变电站 S2 变压器 A 相励磁绕组中的直流电流分别降低 5.07%和 6.2%。因此,在工程中应尽可能采用更高电阻率的钢轨涂层与绝缘。

参考文献

- [1] 张雷. 我国低碳交通的现状和对策分析[J]. 节能技术, 2013, 31(1): 79-83.
ZHANG Lei. The research on low-carbon transport situation and countermeasure in China[J]. Energy Conservation Technology, 2013, 31(1): 79-83.
- [2] 吴晓文, 周年光, 胡胜, 等. 城市轨道交通引起的变压器直流偏磁噪声与振动特性[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 117-122.
WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, HU Sheng, et al. Audible noise and vibration characteristics of DC-bias in power transformers caused by urban mass transit system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 117-122.
- [3] 彭平, 周卫华, 谢耀恒, 等. 关于地铁杂散电流引起的变压器直流偏磁的分析与研究[J]. 变压器, 2017, 54(11): 26-30.
PENG Ping, ZHOU Weihua, XIE Yaoheng, et al. Analysis and research on DC bias of transformer caused by metro stray current[J]. Transformer, 2017, 54(11): 26-30.

- [4] 章彬, 黄炜昭, 陈潇. 直流偏磁对深圳电网主变压器的影响及抑制措施的研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 69-72, 85.
ZHANG Bin, HUANG Weizhao, CHEN Xiao. Probe into impacts of DC magnetic bias on main transformer in Shenzhen power grid and its countermeasures[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(12): 69-72, 85.
- [5] 李强, 叶红枫, 山江川, 等. 直流偏磁对变电站设备的影响分析及抑制方法[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 75-78.
LI Qiang, YE Hongfeng, SHAN Jiangchuan, et al. Analysis of DC bias effect on the substation equipment and its restraining methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(13): 75-78.
- [6] 刘连光, 谢浩铠, 郭世晓. 地磁扰动和接地极共同作用的浙西电网偏磁电流计算[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 22-26, 33.
LIU Lianguang, XIE Haokai, GUO Shixiao. Calculation of bias currents in Zhexi power grid subjected to combined geomagnetic disturbance and ground electrode[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 22-26, 33.
- [7] 苏磊, 赵丹丹, 傅晨钊, 等. 高压直流系统接地极电流的影响及抑制措施研究综述及展望[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 27-34.
SU Lei, ZHAO Dandan, FU Chenzhao, et al. Review and prospect on influence of grounding electrode in HVDC system and its suppression method[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 27-34.
- [8] 朱峰, 李嘉成, 曾海波, 等. 城市轨道交通轨地过渡电阻对杂散电流分布特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2738-2745.
ZHU Feng, LI Jiacheng, ZENG Haibo, et al. Influence of rail-to-ground resistance of urban transit systems on distribution characteristics of stray current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2738-2745.
- [9] CHARALAMBOUS C A. Comprehensive modeling to allow informed calculation of dc traction systems' stray current levels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11): 9667-9677.
- [10] 澹台乐琰, 韩肖清, 王磊, 等. 多列车运行下地铁杂散电流建模仿真[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 7-16.
TANTAI Leyan, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Modeling and simulation of stray current in subway with multi-train operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 7-16.
- [11] 王爱民, 林圣, 李俊逸, 等. 城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1379-1386.
WANG Aimin, LIN Sheng, LI Junyi, et al. Stray current simulation model of the long line of DC metro systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1379-1386.
- [12] OGUNSOLA A, SANDROLINI L, MARISCOTTI A. Evaluation of stray current from a dc-electrified railway with integrated electric-electromechanical modeling and traffic simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5431-5441.
- [13] WANG Aimin, LIN Sheng, HU Ziheng, et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray current of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 114-123.
- [14] 伍国兴, 肖黎, 张繁, 等. 城轨杂散电流在电网系统中的分布特性仿真分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 39-43, 61.
WU Guoxing, XIAO Li, ZHANG Fan, et al. Simulation analysis of distribution characteristics of urban rail transit stray current in power system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 39-43, 61.
- [15] 史云涛, 赵丽平, 林圣, 等. 城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J/OL]. 电网技术: 1-8[2021-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200814.0914.003.html>.
SHI Yuntao, ZHAO Liping, LIN Sheng, et al. Analysis of the distribution of stray current in urban power grid and the influencing factors of distribution[J/OL]. Power System Technology: 1-8[2021-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200814.0914.003.html>.
- [16] 王乃永, 官澜, 李静, 等. 地铁牵引供电系统对公网谐波影响仿真研究[J]. 陕西电力, 2010, 38(4): 30-33.
WANG Naiyong, GUAN Lan, LI Jing, et al. Simulation & study on impact of metro traction power supply system on public power system harmonics[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(4): 30-33.
- [17] 李波涛. 城市轨道交通车辆牵引能耗的影响因素[J]. 节能技术, 2014, 32(4): 377-380.
LI Botao. Analysis of influencing factors of the traction energy consumption of rail transit vehicles[J]. Energy Conservation Technology, 2014, 32(4): 377-380.
- [18] 荣娜, 韩松, 彭小俊. 基于PSCAD的城市轨道交通牵引供电系统建模与仿真研究[J]. 贵州电力技术, 2014, 17(6): 27-31.
RONG Na, HAN Song, PENG Xiaojun. Research on modeling and simulation of rail transit traction power

supply system based on PSCAD[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2014, 17(6): 27-31.

- [19] 李嘉成. 城市轨道交通杂散电流分布特性及仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- [20] 刘连光, 赵夏瑶, 张述铭, 等. 接地极偏磁治理对电网 GIC 的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3594-3600.
LIU Lianguang, ZHAO Xiayao, ZHANG Shuming, et al. Influence of DC bias suppression of grounding electrodes on power grid GIC[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3594-3600.
- [21] 交流电气装置的接地设计规范. 中国标准书号: GB/T 50065-2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [22] 张迺龙, 刘洋, 陈杰, 等. 望红线电力电缆隧道安全性评估[J]. 节能技术, 2020, 38(6): 545-549.
ZHANG Nailong, LIU Yang, CHEN Jie, et al. Safety evaluation of power cable tunnel on wanghong line[J]. Energy Conservation Technology, 2020, 38(6): 545-549.
- [23] CHARALAMBOUS C A. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8): 3530-3538.
- [24] BOCHARNIKOV Y V, TOBIAS A M, ROBERTS C, et al. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways[J]. Iet Electric Power Applications, 2007, 1(5): 675-682.
- [25] 全江涛, 谢志成, 陈科基, 等. 特/超高压直流输电系统单极运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 787-793.
QUAN Jiangtao, XIE Zhicheng, CHEN Keji, et al. Mechanism analysis and simulation of DC current distribution along transformer neutral point under the condition of UHVDC/HVDC single-pole operation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 787-793.

收稿日期: 2021-02-25.

作者简介:

罗远国(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器直流偏磁以及新能源接入配网;

刘 君(1982—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为变电设备智能化及故障诊断;

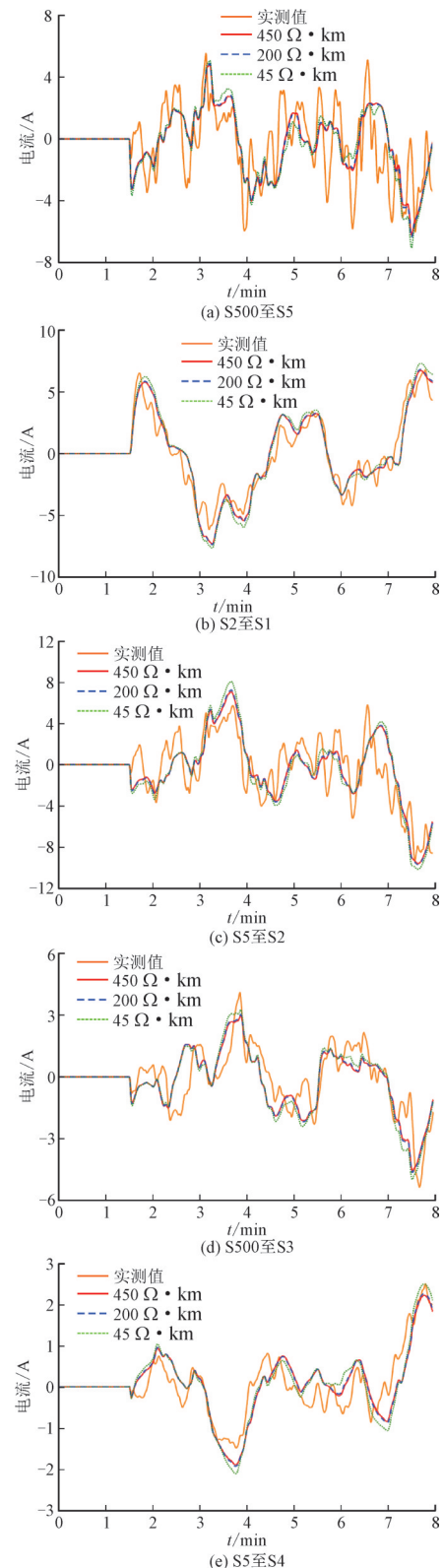
毛钧毅(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统大数据分析与应用;

荣 娜(1979—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子装备与系统、电力市场;

王乃进(1993—), 男, 硕士, 研究方向为光伏发电接入系统分析。

(编辑 徐花荣)

附录:



图A 某片区电网输电线路直流电流分布
Fig.A Direct current distribution in the transmission lines of the AC power grid in a certain area

(下转第46页)

- HOU Chunping, ZHANG Hengguang, ZHANG Wei, et al. Identification method of transmission line insulator self-detonation defect[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(6):1-6.
- [12] 林刚, 王波, 彭辉, 等. 基于改进 Faster-RCNN 的输电线路巡检图像多目标检测及定位[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5):213-218.
- LIN Gang, WANG Bo, PENG Hui, et al. Multi-target detection and location of transmission line inspection image based on improved Fir-RCNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):213-218.
- [13] 李军锋, 王钦若, 李敏. 结合深度学习和随机森林的电力设备图像识别[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3705-3711.
- LI Junfeng, WANG Qinruo, LI Min. The combination of deep learning and random forest electrical force equipment image recognition[J]. High Voltage Engineerin, 2017, 43(11):3705-3711.
- [14] LING Z, QIU R C, et al. An accurate and real-time method of self-blast glass insulator location based on faster R-CNN and U-net with aerial images[J]. Energy Weekly News, 2020, 5(4):474-482.
- [15] DU L Q, et al. Insulator detection based on SSD with the default box adaptively selection[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering. ACM, 2018: 110.
- [16] 赖秋频, 杨军. 基于 YOLOv2 网络的绝缘子自动识别与缺陷诊断模型[J]. 中国电力, 2019, 52(7):31-39.
- LAI Qiupin, YANG Jun. Automatic insulator recognition and defect diagnosis model based on YOLOv2 network[J]. Electric Power, 2019, 52(7):31-39.
- [17] 颜宏文, 陈金鑫. 基于改进 YOLOv3 的绝缘子串定位与状态识别方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2):423-432.
- YAN Hongwen, CHEN Jinxin. An improved YOLOv3-based insulator string location and state recognition method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2):423-432.
- [18] 郭敬东, 陈彬, 王仁书, 等. 基于 YOLO 的无人机电力线路杆塔巡检图像实时检测[J]. 中国电力, 2019, 52(7):17-23.
- GUO Jindong, CHEN Bin, WANG Renshu, et al. YOLO-based uav power line tower patrol image real-time detection[J]. Electric Power, 2019, 52(7):17-23.
- [19] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement [DB/OL]. (2018-04-08) [2018-10-18]. <http://arXiv.org/pdf/1804.02767.pdf>.
- [20] 谭俊. 一个改进的 YOLOv3 目标识别算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

收稿日期: 2020-06-08。

作者简介:

唐睿(1972—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为智能电网;

张铭予(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路设备识别;

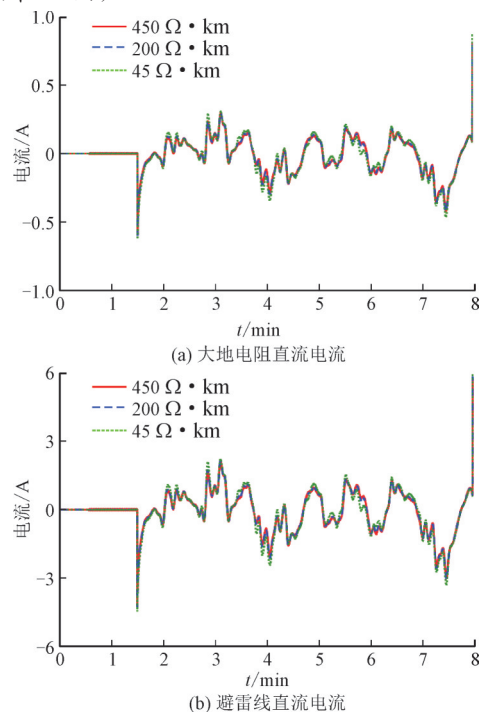
徐宏(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网智能运维;

李微(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为输电线路设备识别;

李文波(1974—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为智能电网。

(编辑 沈卢)

(上接第 40 页)



图B S2至S5杂散电流分布

Fig.B Direct current distribution from substation S2 to Substation S5