

城市电网中地铁杂散电流分布规律 及影响因素分析

史云涛¹, 赵丽平¹, 林圣¹, 任永浩¹, 王爱民¹, 伍国兴²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031;

2. 深圳供电局有限公司, 广东省 深圳市 518000)

Analysis of Distribution of Metro Stray Current in Urban Power Grid and Its Influencing Factors

SHI Yuntao¹, ZHAO Liping¹, LIN Sheng¹, REN Yonghao¹, WANG Aimin¹, WU Guoxing²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In order to reveal the distribution and influencing factors of metro stray current in the urban power grid, based on PSCAD/EMTDC electromagnetic simulation platform, this paper establishes the simulation model of the stray current distribution in the urban power grid with 220kV and above voltage level in this area combined with the actual topology structure and the electrical parameters of the power grid in a certain area of Shenzhen Power Grid. The simulation model simulates the operating conditions of metro at the early departure time, and is verified with the measured data of the neutral point DC of the grounding transformer. It analyzes the stray current distribution characteristics in the urban power grid. In addition, it studies the effects of the transformer leakage reactance, resistivity, and the nominal area of the lightning conductors on the distribution of metro stray current in the urban power grid. The results show that when metro stray current invades the urban power grid, there will be stray current in the transmission lines, the lightning protection lines and the ground, and the stray current will mainly propagate through the transmission lines. When the leakage reactance of the transformer increases, the stray current flowing to the transformer decreases; When the earth resistivity near the grounding transformer decreases, the direct current at neutral point of the transformer increases; The change of the nominal area of the lightning protection line has little influence on the distribution of metro stray current in the power network.

KEY WORDS: metro stray current; urban power grid; direct

current at neutral point of transformer; distribution; influencing factors

摘要: 为揭示城市电网中地铁杂散电流的分布规律及其影响因素, 该文基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 结合深圳电网某片区电网的实际拓扑结构及电气参数, 建立包含该片区 220kV 及以上电压等级交流电网的杂散电流分布仿真模型, 利用地铁早发车时段内片区电网中变压器中性点直流电流的实测数据对仿真模型进行校验。在此基础上, 仿真分析城市电网中地铁杂散电流的分布规律与特征; 并分析变压器漏抗、大地电阻率及避雷线的标称面积等因素对城市电网中地铁杂散电流分布的影响。仿真结果表明, 当地铁杂散电流入侵城市电网时, 输电线路、避雷线及大地中均存在杂散电流, 且杂散电流主要通过输电线路进行传播; 当变压器漏抗增大时, 流向该变压器的杂散电流将减小; 当接地变压器附近的大地电阻率变小时, 变压器中性点直流电流增加; 而避雷线标称面积的改变对地铁杂散电流分布影响微弱。

关键词: 地铁杂散电流; 城市电网; 变压器中性点电流; 分布规律; 影响因素

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0244

0 引言

为解决城市交通拥堵问题, 目前轨道交通应用日益广泛^[1]。由于城市轨道交通供电牵引网采用直流供电, 钢轨作为其直流供电回流的媒介, 多数情况下由于工艺问题等原因使得钢轨与大地之间无法做到完全绝缘, 导致钢轨向周围土壤介质泄露一定的直流电流, 该直流电流被称为杂散电流^[2-3]。由于城市电网中存在大量接地变压器, 因此当杂散电流在大地中流通时, 可通过大地流入到接地变压器所连接的接地网中, 进而入侵城市电网^[4]。杂散电

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677153); 四川省科技计划资助项目(2018GZ0020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51677153); Sichuan Science and Technology Program (2018GZ0020).

流入城市电网时,可导致变压器发生直流偏磁现象,使得变压器振动加剧、噪声增大、局部温升增加,严重时可大大影响变压器的使用寿命;同时杂散电流的入侵可导致电网的电抗器谐波增加、接地网加速腐蚀等现象,给电网的正常运行带来严重隐患^[5-8]。近年来随着城市轨道交通的发展,由地铁杂散电流导致的变压器直流偏磁问题越来越为频繁;且电网负荷密度越大,变电站地理位置越集中,就越容易受到来自地铁杂散电流的入侵^[9]。目前,长沙、深圳、贵阳、福州、成都等地城市电网运行均因地铁线路的开通而受到影响,接地变压器出现了严重的直流偏磁问题^[5,9-12]。

目前,针对杂散电流入侵城市电网的研究,主要集中在杂散电流对变压器的振动、噪声、无功损耗的影响以及变压器直流偏磁的特性分析与控制方法等方面^[7-8,11,13-20]。如文献[17]研究杂散电流入侵城市电网导致接地变压器直流偏磁发生后,变压器的噪声与振动的特性变化,并基于其特性变化对变压器直流偏磁的状态进行有效评估;文献[20]则主要研究变压器直流偏磁的发生机理及其抑制措施,并验证该抑制措施的可行性与正确性。但目前对城市电网中地铁杂散电流的分布规律及其影响因素方面的研究却鲜有报道^[9-10]。而明确地铁杂散电流在城市电网的分布规律及影响因素可有效指导城市电网中地铁杂散电流的监测,以及有效指导变压器直流偏磁的抑制。

基于此,本文以深圳电网某片区电网为研究对象,建立包含该片区电网 500kV 及 220kV 电压等级交流电网的杂散电流分布仿真模型。通过利用地铁早发车时段变压器中性点直流电流的实测数据验证模型的正确性,并通过仿真明确地铁杂散电流在城市电网的分布规律及影响因素,该研究对于城市电网中地铁杂散电流的监测与杂散电流导致变压器直流偏磁的防护与治理具有重要指导意义。

1 城市电网中杂散电流分布仿真模型

为有效减小城市电网建模的复杂程度、更为清晰地分析城市电网中地铁杂散电流的分布规律,本文选取某一片区电网作为研究对象,建立城市电网中杂散电流分布仿真模型,而其余外部直流通路均使用电阻等效。由于 110kV 及以上电压等级输电线路的避雷线(架空地线)均为有效接地,因而建模时需考虑避雷线的等效建模;各变电站间的距离分布通过大地等效电阻模拟;同时,城市电网中地铁杂散电流的注入由受变压器中性点直流电流实测值

控制的电流源模拟,该电流源可实现杂散电流向城市电网的动态输入。总体上,城市电网中地铁杂散电流分布仿真模型主要包含无穷大电源、变压器、输电线路、避雷线、等效负载、大地电阻分布网络、杂散电流的注入源以及系统外部等效电阻等部分。

1.1 城市电网片区电网等效模型

根据深圳电网中某片区电网的实际运行工况及参数建立城市电网中地铁杂散电流分布仿真模型。该片区网主要由一个 500kV 变电站(F 站)和五个 220kV 变电站(A、B、C、D、E 站)组成,如图 1 所示;其中 F 站中有 3 台 500kV 三相自耦变压器并列运行,A、B、C、D、E 站中主变压器均为 2~3 台三相三绕组变压器,且均为单台接地运行。

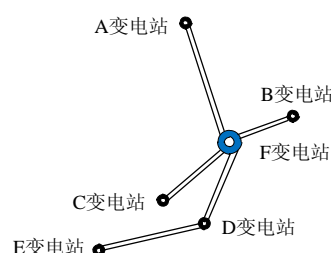


图 1 城市电网片区电网的拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the topology of a power grid in a district

各变电站间距离如表 1 所示,且 500kV 变电站与各 220kV 变电站之间均为双回线路。

表 1 各变电站间地理距离					
变电站	B	C	D	E	F
A	9.91	8.20	10.19	12.16	6.35
B	—	12.99	12.98	17.43	4.82
C	—	—	2.64	4.53	8.16
D	—	—	—	4.94	8.53
E	—	—	—	—	12.56

城市电网地铁杂散电流分布仿真模型中,变压器等效模型参数可根据各变压器铭牌参数进行设置,主要包括变压器容量、额定电压、等效漏抗、额定磁通、饱和参数以及励磁参数等。其中等效漏抗作为变压器的重要参数,工程实际为了简化等效电路从而精简计算,其大小可近似认为等于变压器短路阻抗的大小^[21],因此当变压器的基准容量、基准电压分别为其自身的额定容量与额定电压时,变压器等效漏抗标幺值 X_k 的计算公式为

$$X_k \approx \frac{U_k \%}{100} \quad (1)$$

式中 $U_k\%$ 为变压器的短路电压。

根据该片区电网的拓扑结构及其供电方式,利用线路的实际参数对各输电线路进行建模^[22]。考虑到地铁杂散电流为直流电流,且杂散电流分布研究

无需考虑暂态及谐波的影响,因此仿真模型输电线路使用 Bergeron 线路模型,该线路模型可简化输电线路的参数设置。线路模型参数主要包括线路长度、阻抗、对地电容等。

由于 220kV 输电线路的避雷线(架空地线)直接接地,存在杂散电流流通的可能,因此需对避雷线进行等效建模。仿真模型中利用直流电阻对避雷线进行等效。工程实际中 220kV 输电线路均采用 2 根避雷线,故避雷线等效电阻 R_w 的计算公式为

$$R_w = \frac{1}{2} r_w L_w \quad (2)$$

式中: r_w 为避雷线在单位长度下的电阻值, Ω/m , 根据避雷线设计标准对其进行取值^[23]; L_w 为避雷线的长度, m 。

地铁杂散电流将在大地土壤中流通,因而需对大地网络进行等效建模。本文采用网络化建模方法将大地网络等效为变电站接地网的接地电阻和两变电站间的大地等效电阻^[22,24]。接地电阻表示接地网到无穷远处的散流作用,大地等效电阻则表示两变电站间的散流作用,大地等效网络模型示意图如图 2 所示。

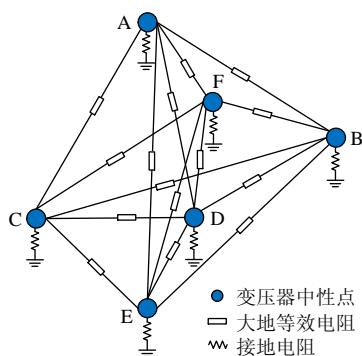


图 2 大地等效网络模型示意图

Fig. 2 Model diagram of geodetic equivalent network

图 2 中接地电阻可由设计标准或现场实测得到^[25];大地等效电阻 R_{g12} 可采用静电比拟法进行数值计算^[24],其计算公式如式(3):

$$R_{g12} = \frac{\rho}{2\pi r_1} \left(\frac{d}{r_2} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为两变电站间大地电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; d 为两变电站间的直线距离, m ; r_1 、 r_2 分别为变电站 1 和变电站 2 接地网的等效半径, m 。

1.2 地铁杂散电流对城市电网入侵的等效

与直接地极所产生的入地直流不同的是,地铁杂散电流的变化速度更快且短时间内无规律可循,当其入侵城市电网时,城市电网接地变压器的中性点直流电流实测波形如图 3 所示。由图 3 可知,该中性点直流电流所呈现的规律较弱,且短时间内

幅值变化较大。PSCAD 元件库中的电源元件很难模拟出无规律变化的直流电源,因此为接近实际工况,实现地铁杂散电流对城市电网入侵的等效模拟,本文在 PSCAD 软件中采用外部控制电流源元件,电流源的外部控制数据采用接地变压器中性点直流电流的实测数据。该模拟可实现地铁杂散电流对城市电网的动态输入,使得城市电网中地铁杂散电流的分布规律更加准确,电气参数对城市电网中地铁杂散电流分布的影响更加清晰。

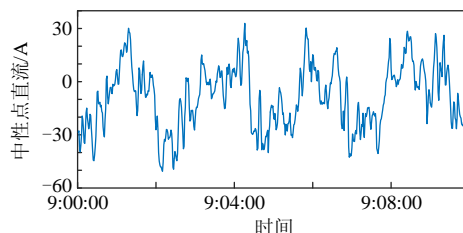


图 3 接地变压器中性点直流电流实测波形

Fig. 3 Measured waveform of direct current at neutral point of grounding transformer

2 模型验证及杂散电流分布规律分析

2.1 模型校验

由于早发车期间地铁线路运行情况简单,可以排除多线路、多车辆运行等情况干扰^[4],因此本文利用地铁早发车时段片区电网中变压器中性点直流电流的实测数据进行模型校验。由于 F 变电站距离某地铁线路车辆段较近,且研究发现地铁车辆段处泄露杂散电流最大^[26],因此本文将地铁早发车时段内(05:40—05:46) F 变电站接地变压器的实测中性点直流电流注入到对应接地变压器的中性点,以表示地铁杂散电流对城市电网的入侵。在 2019 年 11 月 26 日 05:40—05:46 时间段的现场测试期间, A 变电站投入电容隔直装置,故将仿真模型中 A 变电站的变压器也通过电容隔直装置接地。将 F 变电站的实测数据注入所建立的模型,得到仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知,地铁早发车时段各变电站接地变压器中性点直流电流仿真波形与实测波形的趋势保持一致。由于仿真模型 A 变电站投入电容隔直装置,因此其中性点直流电流仿真值为 0A,现场测试期间由于测试设备存在零漂、干扰等原因,其实测值与仿真值有所不同,但幅值相差不大;其他各变电站变压器中性点直流电流仿真值与实测值的幅值大小也有一定偏差(平均误差约为 16%),但偏差主要出现在变压器中性点直流电流较小的情况,中性点直流电流较大时偏差较小(平均误差约为 7%)。

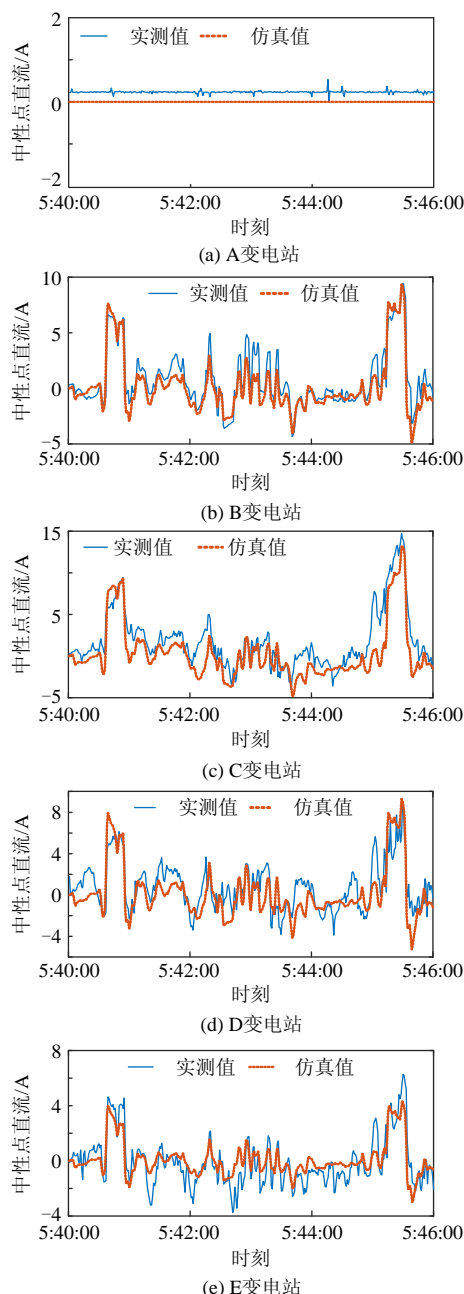


图4 各220kV变电站中性点直流仿真值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between simulation value and measured value of neutral DC in each 220kV substation

对于实际工程而言, 这些较大的直流电流正是需要引起运行人员关注的电流, 较小的直流电流并非治理目标, 因此对于较小的直流电流具有相对较大的误差并不会引起运行人员的误决策; 加之现场测量设备存在零漂, 实测结果有表计误差等现象, 这样的偏差也是可以接受的^[22,27]。综上, 本文通过对各接地变压器中性点直流仿真值与实测值的对比分析, 验证该仿真模型的有效性与可靠性, 此模型可用于进行城市电网中地铁杂散电流的分布规律及影响因素研究。

2.2 城市电网中杂散电流分布规律分析

为明确城市电网地铁杂散电流的分布, 本文基

于上述仿真模型, 通过监测各电气元件的直流电流分量, 研究地铁杂散电流的分布规律。设置仿真时长为7min, 其中0~1min为系统无杂散电流注入、稳定运行时间, 1min时杂散电流源启动、注入地铁杂散电流。输电线路、避雷线及等效地网中的杂散电流分布如图5—7所示。

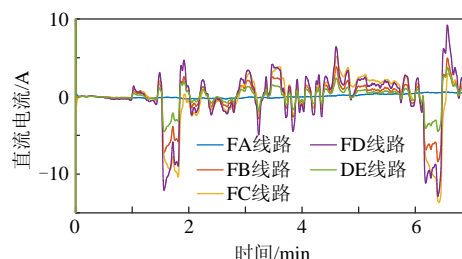


图5 220kV输电线路中的杂散电流

Fig. 5 Stray current in transmission lines of 220kV

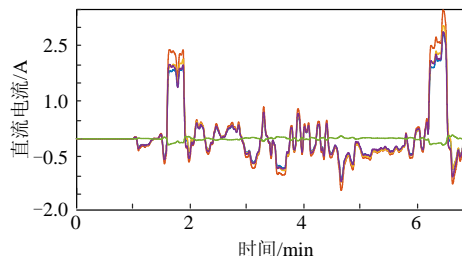


图6 避雷线中流通的杂散电流

Fig. 6 Stray current in lightning protection wire

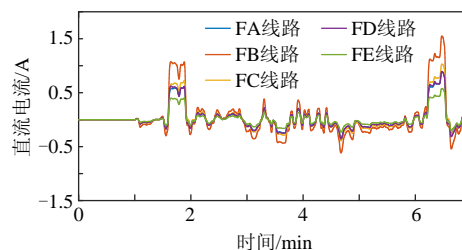


图7 大地等效网络中流通的杂散电流

Fig. 7 Stray current in geodetic equivalent network

由图5—7可知, 当地铁杂散电流入侵城市电网时, 城市电网的输电线路、避雷线和大地等效网络均存在地铁杂散电流。且根据各部分的杂散电流含量可知, 输电线路中流通的直流电流远远大于其他等效网络, 因此杂散电流在城市电网中主要通过输电线路进行传播。由于输电线路参数、变压器参数、各变电站的距离不同等原因, 输电线路、避雷线及大地等效网络中各条线路的杂散电流含量也有所不同。

由于A变电站接地变压器投入电容隔直装置, 因此F至A变电站的输电线路中无杂散电流, 但杂散电流存在于F至A变电站的避雷线及大地中; 因此由仿真结果可知, 当接地变压器投入电容隔直装置后, 地铁杂散电流虽无法入侵该变电站的接地变压器, 但连接该变电站的避雷线及大地依然可与其

他接地点构成城市电网地铁杂散电流流通回路。

3 城市电网中杂散电流分布影响因素研究

3.1 变压器漏抗对杂散电流分布的影响

由图 4 中各变电站接地变压器的中性点直流电流及表 1 中各变电站的距离可知,当地铁杂散电流在城市电网传播时,虽 B 变电站(距离 F 变电站 4.82km)较 C 变电站(距离 F 变电站 8.16km)距离 F 变电站更近,即导线的直流阻抗更小,但 C 变电站受杂散电流的影响更为严重;且通过 24h 实测数据并取其绝对值的算术平均后可知(如图 8),C 变电站中性点直流电流最大。通过对各变电站中变压器参数的对比发现,C 变电站接地变压器的漏抗参数最小,如表 2 所示。因此,本文在研究杂散电流分布规律的基础上,展开变压器漏抗参数对城市电网中杂散电流的分布影响研究。由于变压器中性点直流电流代表杂散电流的分布及其对该变压器的入侵程度,因此本文通过改变 C 变电站变压器的漏抗,分析漏抗大小对变压器中性点直流电流的影响,仿真结果如图 9 所示。

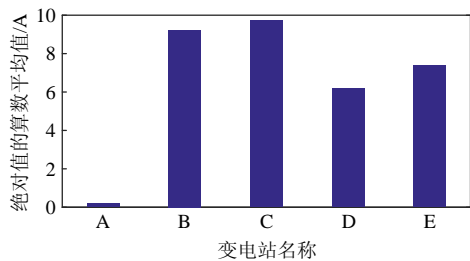


图 8 220kV 各变电站中性点直流电流大小

Fig. 8 Magnitude of direct current at the neutral point of transformers in each substation of 220kV

表 2 各变电站接地变压器漏抗参数
Table 2 Parameters of leakage reactance of grounding transformer in each substation

变电站接地变压器	漏抗有名值/ Ω
A 变电站	29.73
B 变电站	43.88
C 变电站	29.08
D 变电站	39.26
E 变电站	40.12

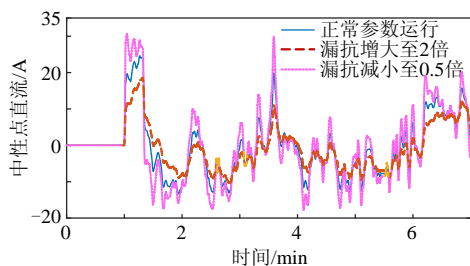


图 9 漏抗对变压器中性点直流电流大小的影响

Fig. 9 Effect of leakage reactance on direct current at neutral point of transformer

由图 9 可知,当变压器以实际漏抗参数运行时,流入该变压器的杂散电流最大值为 24.63A,该时段内变压器中性点直流电流绝对值的算术平均值为 7.08A;当变压器漏抗增至实际漏抗的 2 倍时,流向该变压器杂散电流的最大值减至 18.57A,变压器中性点直流电流绝对值的算术平均值为 5.46A,比实际运行参数减少 22.9%;当减少该变压器漏抗至实际漏抗的 0.5 倍时,流向该变压器杂散电流的最大值增至 30.63A,变压器中性点直流电流绝对值的算术平均值为 8.80A,比实际运行参数增加 24.3%。

基于以上数据可得出,当地铁杂散电流在城市电网中传播时,其更容易流向漏抗较小的接地变压器;因而运维人员需重点监测与关注漏抗较小的接地变压器的运行状态,这对杂散电流导致变压器直流偏磁现象的监测和防护具有一定指导意义。

3.2 变电站附近大地电阻率对杂散电流分布的影响

在实际工程中,各变电站由于地理位置及附近地质、土壤湿度不同等原因,各变电站附近的大地电阻率也有所不同;且由图 7 可知,地铁杂散电流在电网中传播时,大地是其传播的重要路径,在考虑各变电站附近土壤的等效面积确定时,大地等效电阻的大小主要取决于土壤电阻率的大小,因此基于电路理论,各变电站坐落地理位置的土壤电阻率也是影响杂散电流分布的重要因素。本文在保证仿真工况不变时,仅通过改变 C 变电站附近 2km 的大地土壤电阻率大小,研究当杂散电流入侵城市电网时,变电站附近大地电阻率对杂散电流分布的影响。其中,由于土壤电阻率随地质不同或土壤湿度的变化,其取值均介于 30~300 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间甚至更大,因此仿真模型在大地电阻率改变后,C 变电站附近 2km 的大地电阻率取为 30 $\Omega\cdot\text{m}$,大地电阻率改变前,C 变电站附近 2km 的大地电阻率为 300 $\Omega\cdot\text{m}$ 。C 变电站大地电阻率改变前后各变电站中性点直流电流大小的对比如图 10 所示。

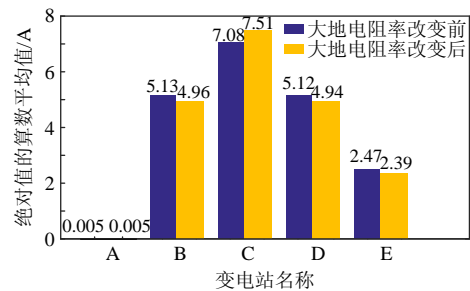


图 10 220kV 各变电站中性点直流电流绝对值的算术平均值大小对比

Fig. 10 Comparison of the arithmetic mean value of the absolute value of the DC at the neutral point of each 220kV substation

由图 10 可看出,当 C 变电站附近 2km 的大地电阻率减小时,C 变电站中性点直流电流绝对值的算术平均值由 7.08A 增大到 7.51A,增长 6.1%;其他几个变电站由于附近大地电阻率不变,其中性点直流电流绝对值的算术平均值均有所下降,平均降幅约为 3.4%,即地铁杂散电流更多的流向 C 变电站;A 变电站由于电容隔直装置始终处于投入状态,因此其中性点直流始终接近 0A。

可见地处大地电阻率相对较小区域(如靠近河流或较湿润地区)的变电站更容易受到地铁杂散电流的侵袭,变电站中性点直流电流相对较大,接地变压器发生直流偏磁的可能性更高,运行人员需更加关注该地理位置变电站接地变压器的运行情况,以防止直流偏磁的发生。

3.3 避雷线的选型对杂散电流分布的影响

由图 6 可知,当地铁杂散电流入侵城市电网时,避雷线可作为杂散电流的直流通路。因此从理论而言,避雷线参数也是影响城市电网中杂散电流分布的因素之一。实际工程中,220kV 电压等级输电线路常规避雷线型号一般为 JLB20A-100 或 JLB20A-120,二者仅标称面积存在不同。因此本文进行两类标称面积不同的避雷线对变压器中性点直流电流影响的对比分析,结果如图 11 所示。

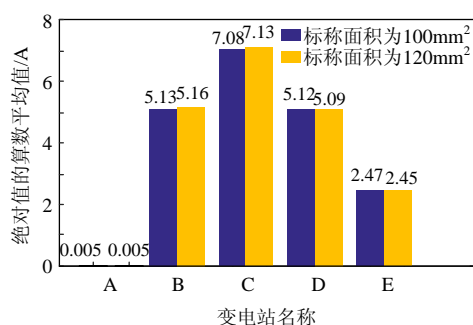


图 11 标称面积不同时各变电站中性点直流电流绝对值的算术平均值大小对比

Fig. 11 Comparison of the arithmetic mean of the absolute value of the DC at the neutral point of each substation with different nominal areas

由图 11 可知,当避雷线的标称面积由 100mm²增至 120mm²时,B、C 两变电站中性点直流电流绝对值的算术平均值有所增加,平均增幅 0.0065%;D、E 两变电站中性点直流电流绝对值的算术平均值有所减小,平均降幅 0.007%。A 变电站由于电容隔直装置始终处于投入状态,因此其中性点直流始终接近 0A。综上所述,避雷线标称面积变化时,杂散电流在城市电网的分布并未发生大的改变,避雷线标称面积的变化对城市电网中杂散电流分布的影响微弱。

4 结论

本文基于 PSCAD/EMTDC 电磁仿真平台,通过对城市电网建模与地铁杂散电流入侵城市电网的仿真,研究杂散电流在城市电网中的分布规律,并仿真分析城市电网中地铁杂散电流分布所受影响因素,该仿真分析充分利用现场实测数据,主要得到以下结论:

1) 当地铁杂散电流入侵城市电网时,城市电网的输电线路、避雷线和大地等效网络中均存在杂散电流,且杂散电流主要通过输电线路进行传播;此外,若城市电网中存在已投入电容隔直装置的变电站,经过该变电站的避雷线及大地仍可与其他接地点构成城市电网的地铁杂散电流通路。

2) 对于城市电网中地铁杂散电流分布的影响因素研究,本文得出漏抗较小或坐落在大地电阻率较小区域的接地变压器更容易受到地铁杂散电流的影响;通过对比分析发现,避雷线标称面积的改变对杂散电流分布的影响微弱。因此,当地铁杂散电流入侵城市电网时,运行人员应更加关注漏抗较小或坐落在大地电阻率较小区域的接地变压器的运行状态,这对于城市电网中地铁杂散电流的监测与变压器直流偏磁的及时发现具有重要意义。

参考文献

- [1] 蔡力,王建国,樊亚东,等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604-3610.
CAI Li, WANG Jianguo, FAN Yadong, et al. Influence of the track-to-earth resistance of subway on stray current distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3604-3610(in Chinese).
- [2] CJJ 49—92, 地铁杂散电流腐蚀防护技术规程[S]. 北京: 北京市地下铁道科学技术研究所, 1993.
- [3] LIN Sheng, ZHOU Qi, LIN Xiaohong, et al. Infinitesimal method based calculation of metro stray current in multiple power supply sections[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 96581-96591.
- [4] 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 Trans. Power Del., [2020-02-20]. doi:10.1109/TPWRD.2020.2975367.
- [5] 刘味果,周卫华,叶会生,等. 长沙地铁轨道交通对交流电网的影响及治理措施的研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(1): 7-9, 13.
LIU Weiguo, ZHOU Weihua, YE Huisheng, et al. Research on influence and control measures of metro railtransit on AC network in Changsha[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(1): 7-9, 13(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 段炼,江安烽,傅正财,等. 多直流接地系统单极运行对沪西特高压变电站直流偏磁的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 132-137.
DUAN Lian, JIANG Anfeng, FU Zhengcai, et al. Impact of multiple

- HVDC system monopolar operation on DC magnetic biasing in west shanghai UHVAC substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 132-137(in Chinese).
- [8] 全江涛, 童歆, 文习山, 等. 复杂运行工况下变压器直流偏磁的抑制[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2464-2472.
QUAN Jiangtao, TONG Xin, WEN Xishan, et al. Mitigation of transformer DC bias in complicated operation conditions[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2464-2472(in Chinese).
- [9] 伍国兴, 陈龙, 史云涛, 等. 深圳变电站 500kV 主变压器直流偏磁现象测试及抑制分析[J]. 广东电力, 2020, 33(1): 118-124.
WU Guoxing, CHEN Long, SHI Yuntao, et al. Test and analysis of DC bias of main transformer in shenzhen substation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(1): 118-124(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 章彬, 黄炜昭, 陈潇, 等. 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, et al. Probe into impacts of DC magnetic bias on main transformer in Shenzhen power grid and its countermeasures[J]. Shanxi Electric Power, 2014, 42(12): 69-72, 85(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 张艳丽, 王佳音, 白保东, 等. 直流偏磁磁场对硅钢片磁致伸缩特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4299-4307.
ZHANG Yanli, WANG Jiayin, BAI Baodong, et al. Influence analysis of DC biased magnetic field on magnetostrictive characteristics of silicon steel sheet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4299-4307(in Chinese).
- [14] 叶建盈, 陈为, 汪晶慧, 等. PWM 波及直流偏磁励磁下磁芯损耗模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2601-2606.
YE Jianying, CHEN Wei, WANG Jinghui, et al. Research on the core loss model under pwm wave and DC bias excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2601-2606(in Chinese).
- [15] 高沛, 王丰华, 苏磊, 等. 直流偏磁下电力变压器的振动特性[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1536-1541.
GAO Pei, WANG Fenghua, SU Lei, et al. Analysis on vibration characteristics of power transformer under DC bias[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1536-1541(in Chinese).
- [16] 郑涛, 朱先启, 韩东伟, 等. 直流偏磁抑制装置接入对线路距离保护的影响分析[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 545-550.
ZHENG Tao, ZHU Xianqi, HAN Dongwei, et al. Influence of grid-connected DC suppression device on distance protection of transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 545-550(in Chinese).
- [17] 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 powertransformers caused by urban mass transit system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 117-122(in Chinese).
- [18] 师浪夏, 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(in Chinese).
- [19] 王佳音, 白保东, 刘宏亮, 等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 56-61.
WANG Jiayin, BAI Baodong, LIU Hongliang, et al. Research on vibration and noise of transformers under DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56-61(in Chinese).
- [20] 陈志伟, 白保东, 陈德志, 等. 电力变压器直流偏磁现象形成机理及一种抑制措施的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 208-214.
CHEN Zhiwei, BAI Baodong, CHEN Dezhi, et al. Research on the formation mechanism and suppression method of transformer DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 208-214(in Chinese).
- [21] 汤蕴璆. 电机学(第5版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 46-50.
- [22] 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(in Chinese).
- [23] GB/T 1179—2017, 圆线同心绞架空导线[S]. 上海: 中国电器工业协会, 2017.
- [24] 王士营. 地铁对区域电网接地回路直流的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [25] GB/T 50065—2011, 交流电气装置的接地设计规范[S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2012.
- [26] 吴畏, 刘炜. 地铁车场杂散电流偏大的原因及应对措施探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 40-42.
WU Wei, LIU Wei. Exploration of large stray current in metro depot and countermeasures[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 40-42(in Chinese).
- [27] 魏畅. 直流接地极电流场的直流通路网络建模计算与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.



史云涛

在线出版日期: 2020-08-14.

收稿日期: 2020-03-31.

作者简介:

史云涛(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流偏磁抑制方案, E-mail: ytshi0426@163.com;
林圣(1983), 男, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为轨道交通杂散电流防护与抑制等, E-mail: slin@swjtu.edu.cn.

(实习编辑 张文鑫)