

# 轨道交通杂散电流动态波动特性分析及其统计方法研究

陈璐<sup>1</sup>, 王瑞田<sup>2</sup>, 郭志广<sup>2</sup>, 贾跟卯<sup>2</sup>, 王振刚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网上海市电力公司, 电力科学研究院, 上海

<sup>2</sup>北京国网富达科技发展有限公司, 北京

收稿日期: 2021年11月3日; 录用日期: 2021年12月1日; 发布日期: 2021年12月8日

## 摘要

城市轨道交通杂散电流流入城市电网接地的变压器绕组, 造成了变压器的直流偏磁现象, 进而影响变压器甚至是电网的安全稳定运行。针对这一现象, 通过大规模实地监测, 对某华东超大城市的500 kV及220 kV共计11个变电站的直流偏磁监测数据进行分析, 通过对比轨道列车运行特性, 总结分析杂散电流的动态波动特性。结果表明变压器杂散电流的动态特性与城市轨道交通列车的运行特性密切相关, 具有较为明显的波动性、间歇性以及周期性。通过分析杂散电流的地理信息分布及其相关的电网结构, 以及其正负占比特性, 归纳出杂散电流在城市电网关于吸收、传播及散布的电路原理。最后, 基于杂散电流连续监测数据, 提出相应的统计方法。

## 关键词

变压器直流偏磁, 杂散电流, 动态特性, 统计方法, 轨道交通

# Analysis of Dynamic Fluctuation Characteristics of Stray Current in Rail Transit and Research on Its Statistical Methods

Lu Chen<sup>1</sup>, Ruitian Wang<sup>2</sup>, Zhiguang Guo<sup>2</sup>, Genmao Jia<sup>2</sup>, Zhengang Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Grid Electric Power Research Institute, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai

<sup>2</sup>Beijing State Grid Fuda Technology Development, Co., Ltd., Beijing

Received: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Dec. 1<sup>st</sup>, 2021; published: Dec. 8<sup>th</sup>, 2021

文章引用: 陈璐, 王瑞田, 郭志广, 贾跟卯, 王振刚. 轨道交通杂散电流动态波动特性分析及其统计方法研究[J]. 电气工程, 2021, 9(4): 132-143. DOI: 10.12677/jee.2021.94015

## Abstract

The stray current of urban rail transit flows into the grounded transformer winding of the urban power network, resulting in the DC magnetic bias of the transformer, which affects the safe and stable operation of the transformer and even the power grid. In view of this phenomenon, through large-scale field monitoring, the DC magnetic bias monitoring data of 11 substations of 500 kV and 220 kV in East China's megacity are analyzed. By comparing the operation characteristics of rail trains, the dynamic fluctuation characteristics of stray current are summarized and analyzed. The results show that the dynamic characteristics of transformer stray current are closely related to the operation characteristics of the trains of urban rail transit, with obvious volatility, intermittency and periodicity. By analyzing the geographic information distribution of stray current and its related power grid structure, as well as its positive and negative proportion characteristics, the electrical circuit principles about the urban power grid's absorption, propagation and dispersion of the stray current are obtained. Finally, based on the continuous monitoring data of stray current, the corresponding statistical method is proposed.

## Keywords

Transformer DC-Bias, Stray Current, Dynamic Characteristics, Statistical Methods, Rail Transit

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近十年来中心城市对便捷交通的需求使得轨道交通(地铁和轻轨, 以下简称为轨交)的规模越来越大。目前国内的轨交供电多采用直流牵引供电方式, 该供电方式使部分电流由钢轨泄漏流入大地, 构成了所谓的轨道交通直流供电系统的入地杂散电流[1] [2] [3]。这些杂散直流电流会通过城市电网变电站的接地系统包括接地网及接地变压器中性点流入、穿越变压器绕组, 造成变压器的直流偏磁影响, 引起主变振动和噪声加剧等严重的变压器异常状态[4] [5] [6] [7]。

查阅国外对轨道交通杂散电流影响研究的相关文献, 国外对轨道交通杂散电流影响地下供水、供气和供热管网的研究文献及成果较多[8], 而杂散电流对电网变压器偏磁影响的文献鲜见。在国内, 有相关机构开展过大量的轨交杂散直流对变压器偏磁影响的研究[9] [10] [11] [12] [13], 但主要围绕变压器直流偏磁噪声、振动、分布特性以及建模相关的内容, 对变电站变压器中性点杂散电流均未进行统计学方面的研究与分析。此外也有相关学者展开相应的抑制与治理工作[14] [15], 在电网或轨道侧开展多项建模及监测研究, 也在抑制杂散电流及其装置的研究、研制方面进行了实践, 但均未综合考虑电网及其变电站与轨道线路地理位置信息(GIS)、轨道列车运行时空关系等因素, 从变电站与杂散电流多维度关联影响的量化程度方面开展基于区域性大规模同步监测的综合分析和研究。

本文针对城市轨道交通引起的变压器直流偏磁问题, 就某华东超大城市 3 个 500 kV 变电站、8 个 220 kV 变电站展开了大规模监测, 基于交流电网变电站网络以及变压器中性点杂散电流监测情况, 分析发生直流偏磁现象的变压器中性点杂散电流的动态波动特性, 并统计具有代表性的特征参数来表征杂散电流对变压器的影响程度, 据此形成了一套完整的统计分析方法。本文的研究较为系统地分析了城市轨道交通

通杂散电流对变压器的影响特性,为后续对变压器直流偏磁的科学治理提供理论基础与科学支持。

## 2. 杂散电流多源互联变电站的多端特性及杂散电流监测情况

### 2.1. 监测变电站与临近轨道交通线路情况统计及多源多端关系简介

对某华东超大城市 11 个变电站内各变压器中性点杂散电流数据进行监测,包括 3 个 500 kV 变电站以及 8 个 220 kV 变电站,监测所选取的变电站综合考虑多个影响因素,相关信息详见表 1。

**Table 1.** Summary table of relevant information of each monitoring station

**表 1.** 各监测站相关关联信息汇总表

站点名称	电压等级 (kV)	变压器 ID	变电站地理位置信息	站周轨交线路数量	与轨交线路最短/最长距离(m)	站内总杂散电流平均值(A)
JA	500	1#2#	地下、城中心	4	220/760	30.4
SL	500	1#3#4#	地上、近郊	1	400	12.4
WJC	500	1#2#	地下、城区	2	115/3600	10.1
HF	220	1#2#	地上、城中心	3	160/200	6.2
RJ	220	1#2#3#	地上、城中心	1	300	5
TS	220	1#2#	地上、城区	1	300	10.2
XJ	220	12#	地上、城区	3	490/990	5.5
GB	220	1#2#	地上、城区	2	1500/2500	8.2
JH	220	1#2#3#	地上、郊区	1	900	2.9
GD	220	1#	地上、远郊	1	400	1.6
XH	220	2#	地上、远郊	1	4000	1.8

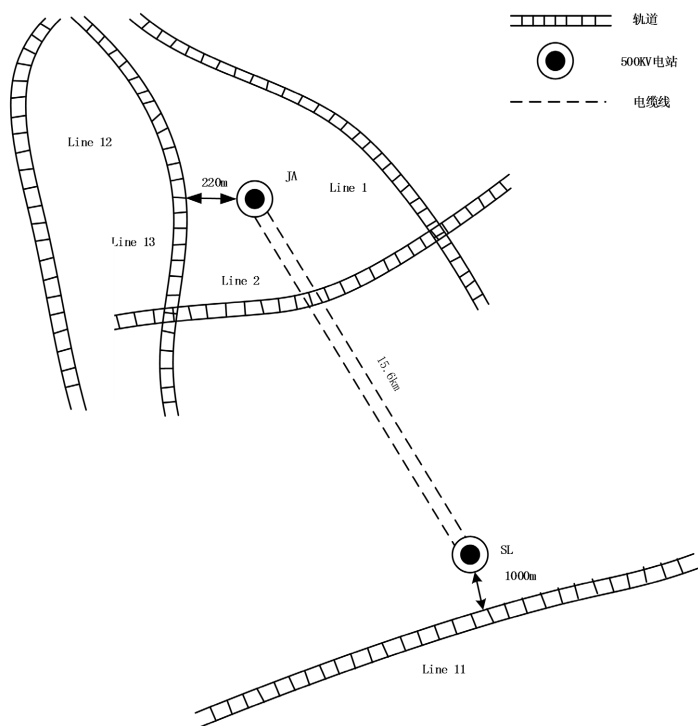
注: WJC 站相关轨道交通为地上轻轨线路,站内总杂散电流平均值(A)为高峰期轨交运行时段。

在所监测 11 个变电站中,同时考虑架空线路或电缆双端互联站和多端互联站情况。JA 与 SL 站为 500 kV 双端互联系统,其轨道交通线路地理位置关系如图 1(a)所示。GB 站与其互联站组成 220 kV 线路电缆多端互联系统,具体情况如图 1(b)所示。

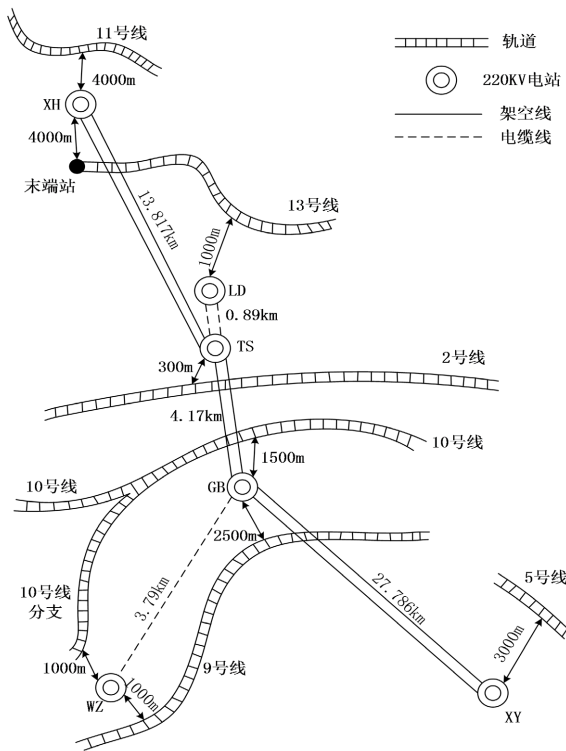
对所监测变电站,基于全天 24 小时内城市轨道交通的运行规律,分别选取轨交运行高峰时段、非高峰时段以及停运时段对变压器中性点杂散电流进行监测,动态波动性监测连续记录时间不少于 5 分钟,监测装置每周波采样 64 点,偏磁直流电流数据取样为每一秒计算一次平均值。在轨交运行高峰期,各变电站站内总杂散电流平均值在表 1 中列出,可以看出所选取监测站因其电压等级、地理位置、站周轨交线路数量以及与轨交线路的距离不同,所受偏磁电流影响程度也不同。电压等级越高、地理位置越靠近城中心以及站周轨交线路数量越多、距离越近,变压器中性点杂散电流平均值越大,说明变电站所受偏磁影响越大。因此对于某一具体变电站,需要结合其相关地理位置信息及电网结构进一步分析,具体分析情况在下文展开,本节不再赘述。

### 2.2. 杂散电流监测情况分析

在轨交运行高峰时段(17:00~19:00)、非高峰时段(19:00~24:00)以及停运时段(0:00~5:00)同步监测各站内主变中性点接地位置杂散电流。图 2 为 500 千伏 JA 站内 1#、2#主变不同时段监测杂散电流波动曲线图。



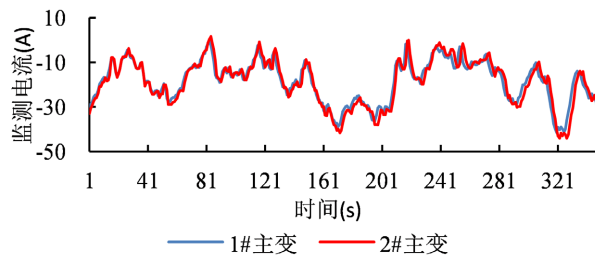
(a) 500 千伏 JA 站 SL 站双端互联



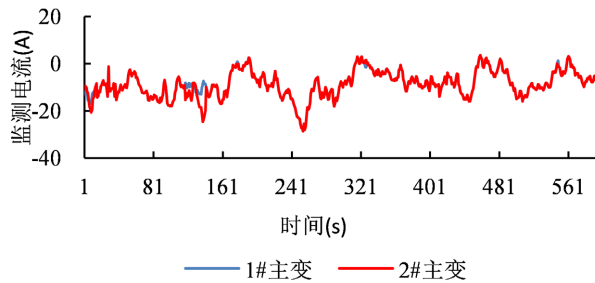
(b) 220 千伏 GB 站多端互联

**Figure 1.** Geographic location diagram of substation power system and rail transit line

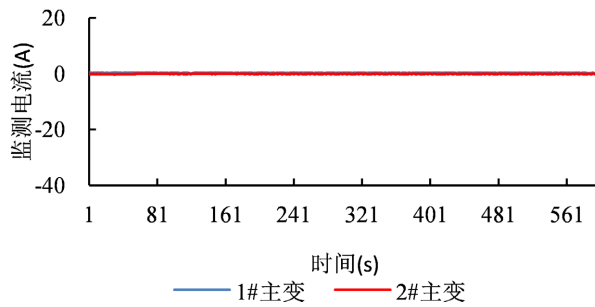
**图 1.** 变电站电力系统及轨道交通线路地理位置关系图



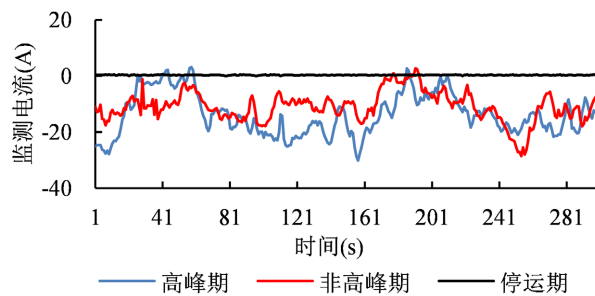
(a) 地铁运行高峰期杂散电流变化曲线



(b) 地铁运行非高峰期杂散电流变化曲线



(c) 地铁停运期杂散电流变化曲线



(d) 1#主变不同时间段杂散电流变化对比

**Figure 2.** Stray current monitoring results of 500 kV JA station  
**图 2.** 500 千伏 JA 站杂散电流监测结果

对比监测所得杂散电流数据，同一变电站内各主变中性点杂散电流在时间维度上存在同步性，大小与变化趋势一致。由图 2 可以看出，在轨道交通运行期间，无论是高峰期还是非高峰期，变压器中性点直流存在且均具有幅值较大的波动性，在轨道交通停运时间段，变压器中性点电流为相对稳定的 0 电流状态，说明城市轨道交通对变压器偏磁具有一定影响。同时，基于对杂散电流的统计发现，轨交高峰期电流平均值及颠峰值比非高峰期大，说明轨道交通运行规律与变压器直流偏磁影响具有相关性。

### 2.3. 杂散电流监测统计与轨道交通运行车辆密度相关性分析

将相关线路工作日轨交列车运行密度(各站点一小时通过列车数量)与 JA 站各时段电流绝对值平均值对比,如图 3 所示。

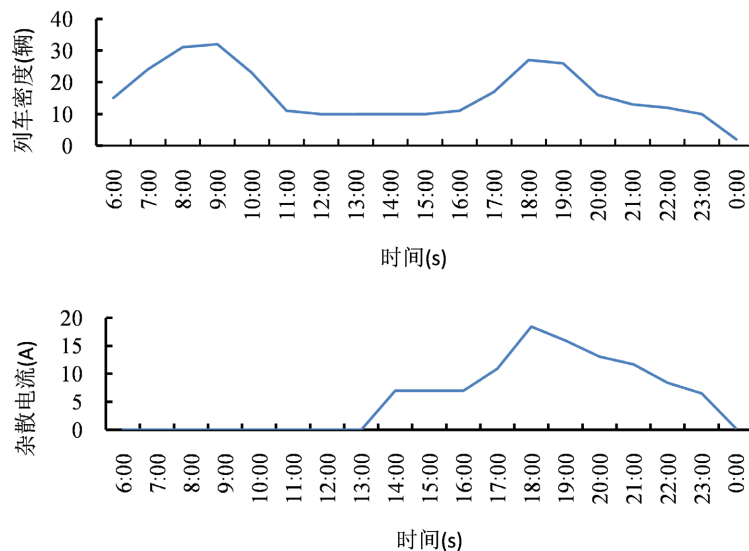


Figure 3. Comparison diagram between train operation density and absolute average value of stray current in each period of JA station

图 3. 列车运行密度与 JA 站各时段杂散电流绝对平均值对比图

由图 3 可以看出,在 14:00 至 0:00 时间段内,JA 站变压器中性点杂散电流与列车运行密度呈现明显的正相关特性,当列车运行密度较大时,变压器中性点受杂散电流影响也相应增加,反之亦然。

通过对杂散电流监测情况的分析对比可以得出,在城市轨道运行的高峰期和非高峰期,变压器中性点有较为明显的直流偏磁现象,而在停运期,变压器中性点杂散电流近乎为零,同时杂散电流的大小与城轨列车密度呈正相关特性。

### 3. 变压器中性点杂散电流相关统计特性分析

定义城市轨道交通杂散电流由大地流向变压器中性点为负值电流,由变压器中性点流向大地为正值电流,基于监测所得的电流数据,分析变压器中性点杂散电流的相关特性。

#### 3.1. 杂散电流波动性、间歇性以及周期性

城市轨道交通列车经过变电站附近时,有匀速运动、进站反向逆变制动、出站加速运动等以 2~3 分钟为循环周期的秒级尺度短时牵引功率变化,由此列车电动机工作产生的负极走行轨电流也以 2~3 分钟级为周期尺度进行秒级快速动态变化,具有相应的冲击浪涌、间歇波动的动态特征。典型的城轨交单台列车运行周期时间约为两分钟至三分钟,包括起步加速、匀速运行、制动减速以及停车上人四个过程。

由轨道交通产生的杂散电流在散布过程中有很大一部分通过城市电网变电站的接地网流入变压器绕组,造成变压器的直流偏磁影响。有关轨道交通标准中轨道杂散电流在高峰期的数值为 2.5 毫安/米[16],本文通过实际监测变压器中性点杂散电流分析其波动性、间歇性以及周期性。

如图 4 所示,500 千伏 JA 站 1#主变和 220 千伏 TS 站 1#主变中性点杂散电流波形均具有一定的波动特性,但其波动的幅值、频率、大小都不尽相同。JA 站与 TS 站内变压器所受杂散电流的影响并不具有



类似于轨道列车运行动态特性那样清晰统一可定量描述的特性，这是因为一座变电站内变压器中性点偏磁电流并非单纯的只受单列及单个站点的轨道交通列车运行影响，而是受到其地理位置上相邻的一条或几条不同长度轨道上的数辆列车的叠加效应影响，除此之外还会受到附近变电站的变压器中性点以及高压、超高压电缆金属屏蔽层共同吸收并散布的杂散电流的叠加影响，因此不同的变电站变压器中性点电流呈现出不同规律的波动性。

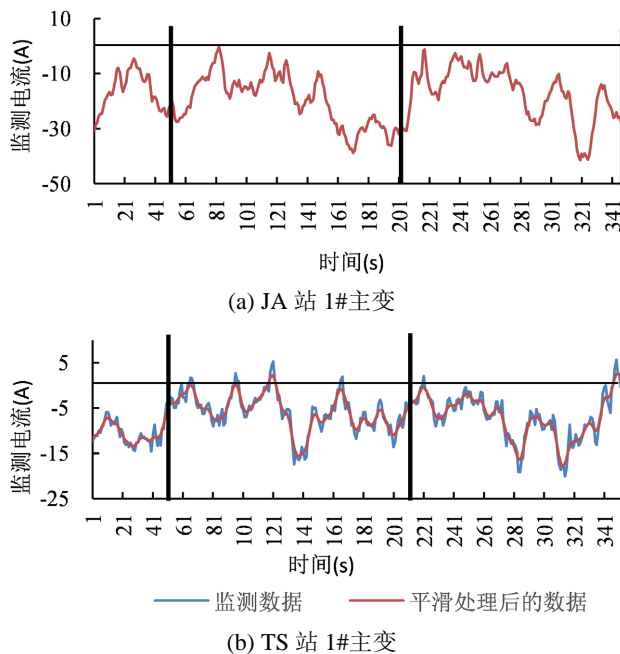


Figure 4. Stray current diagram of curves in different substations  
图 4. 不同变电站杂散电流曲线图

对比于轨道列车运行的间歇性，杂散电流主要表现为间歇性的电流冲击特性。因轨道列车运行时起步加速阶段会造成大量杂散电流的瞬间泄露，而在平稳匀速和减速制动时会有持续的杂散电流泄露，在停车上人阶段不会产生杂散电流，因此变压器中性点杂散电流受轨道列车运行特性影响，会相应的呈现电流的浪涌冲击与间歇特性。

对所监测电流数据预处理，剔除异常数据并进行平滑性分析，相应的拟合曲线如图 4 所示。观察 JA 站 1#主变杂散电流曲线，可以看出在 6 分钟时间段里存在两个类似变化趋势的区间，区间时长在 150 秒左右，相应的 TS 站 1#主变也存在同样现象。结合城市轨道交通列车运行的动态周期特性，可以定性描述变压器中性点杂散电流具有一定的周期性，该周期性与其周围轨交线路的运行规律相关。因不同变电站周边轨道分布不同，其电流波动特性也不尽相同，但均具有各自的波动周期。同时可以看出在每个周期内存在 2~3 次电流的强烈冲击性，该现象与轨交线路上单台列车的运行启停以及多台列车的叠加效应有关。

结合城市轨道交通的运行动态特性，基于大规模的实际监测对不同变电站变压器中性点杂散电流进行波形分析，可以总结得出受城市轨道交通影响，变电站内各主变中性点杂散电流具有波动性、间歇冲击性以及周期性等特性。

### 3.2. 杂散电流动态波动中的幅值分布特性

统计一段时间区间内杂散电流数值的分布直方图，发现杂散电流数值分布呈现一定的正态分布特征，

杂散电流在 50% 区间内的电流总量占该监测时段内电流总量的 80%。

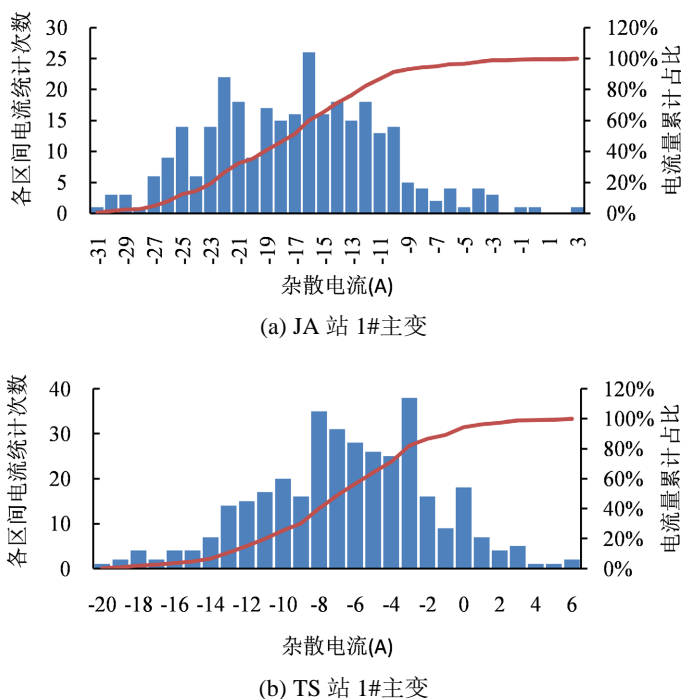


Figure 5. Stray current distribution histogram and current ratio situation

图 5. 杂散电流分布直方图及电流占比情况

图 5(a), 图 5(b) 分别为 500 千伏 JA 站 1#主变和 220 千伏 TS 站 1#主变在高峰时段监测杂散电流的分布直方图, 计算各分布区间内电流总量占整个时间段电流总量的比值并依次累加得到曲线。由图 5 中的分布直方图可以看出, 杂散电流的幅值分布主要集中在电流中值附近, 呈现较为明显的正态分布; 由曲线图可以看出, 在 50% 的分布区间内, 电流累积量占比增长斜率较大, 并且在该区间内的电流总量占比达到 80%。统计结果表明, 在变压器受轨交杂散电流影响期间, 中性点直流电流绝大部分时间均处于一个相对较高的水平, 虽然该电流数值未达到规范所限定的最大电流值, 但若变压器长期处于该杂散电流的偏磁影响下, 所造成的后果依然比较严重。

### 3.3. 杂散电流正负占比特性

对监测所得杂散电流的正负占比特性进行分析, 选取所监测 11 个变电站内各主变在轨交运行高峰时段 5 分钟内的杂散电流数据, 观察其最大值、最小值以及杂散电流正值占比, 结果如表 2 所示。

Table 2. Summary of statistical analysis of each monitoring station

表 2. 各监测站统计分析汇总表

站点及主变编号	最大值(A)	最小值(A)	正值概率(%)
JA 1#	9.2	-34	3.6
JA 2#	9.2	-32	4.1
SL 1#	13.4	-12.3	69
SL 3#	16.5	-13.9	69.5



Continued

SL 4#	14.4	-14.1	62.7
WJC 1#	10.2	-19.3	21.2
WJC 2#	9.5	-16.1	21.7
HF 1#	11.4	-10.8	48.3
HF 2#	6.8	-13.6	40.3
TS 1#	12.8	-14.2	51
TS 2#	8.5	-32.2	25.2
JH 1#	2.9	-1.5	99.3
JH 2#	1.1	0	100
JH 3#	1.4	0.6	100
GD 1#	4	-0.6	99.3
RJ 1#	6.4	-10.8	30.1
RJ 2#	4.9	-8.2	24.8
RJ 3#	9.5	-9.3	47.9
XJ 12#	4.1	-19	89.9
XH 2#	4.4	-5.6	53.7
GB 1#	24	-23	17.5
GB 2#	5.9	-6.2	47.5

对比表 1 与表 2 的数据, 分析总结共存在以下 3 种情况:

(1) 绝对的杂散电流吸入源站, 部分变电站内监测杂散电流整体呈现正值占比较小现象, 即在该变电站主要存在由大地流向变压器中性点的杂散电流, 例如 JA 站、WJC 站等;

(2) 杂散电流散布入地站, 部分变电站内监测杂散电流整体呈现正值占比较大现象, 即在该变电站主要存在由变压器中性点流向大地的杂散电流, 例如 SL 站、JH 站以及 GD 站等;

(3) 同为杂散电流吸入源站和散布入地站, 部分变电站内监测杂散电流正值占比接近 50%, 即在该变电站由大地流向变压器中性点的杂散电流与由变压器中性点流向大地的杂散电流相当, 杂散电流吸收与散布情况较平均, 例如 TS 站、HF 站以及 XH 站等。

对于杂散电流正值占比较大的变电站与正值占比较小的变电站的情况, 考虑其双方互为杂散电流流通的吸收源端与散布入地端。监测结果显示 JA 站主变中性点杂散电流基本为负值, 而其对端 SL 站主变中性点杂散电流则正值占比较大, 同时由图 1 可以看出, JA 站与 SL 站通过电缆线路互联, JA 站既为城市中心地下变电站又紧邻多条城市轨交线路, 因此其吸收杂散电流的能力较强, 而 SL 站远离城市中心且周边轨交线路较简单距离也相对较远, 因此由 JA 站变压器中性点吸入入网的杂散电流通过两站之间的电缆线路由 JA 站流向 SL 站, 再通过 SL 站变压器中性点入地, 形成一个杂散电流吸收入网与散布入地的完整通道, 从而产生了部分变电站内杂散电流正值占比较大而部分变电站内杂散电流占比较小的情况。

对于出现的部分变电站内主变中性点杂散电流呈现正值占比接近 50% 的现象, 考虑变电站周围城市轨交情况, 因相对地理位置与电网结构的复杂性, 造成变电站吸收杂散电流的多源性与不确定性, 因此产生了杂散电流既有流入又有流出的现象。如图 1 所示可以看到 TS 站的地理位置与电网结构, 与其各互联站形成了错综复杂的多端互联系统, 在各变电站受轨交杂散电流影响时, 杂散电流因其具有的特性会

自发的从高密度、高电位场区向低密度、低电位场区散布流动，因此各变电站既作为杂散电流吸收源端同时也是散布入地端。

### 3.4. 杂散电流吸收与散布原理浅析

以所监测双端互联站为例，典型城市电网系统对临近的轨交杂散电流吸收、传播及散布原理如图 6 所示。

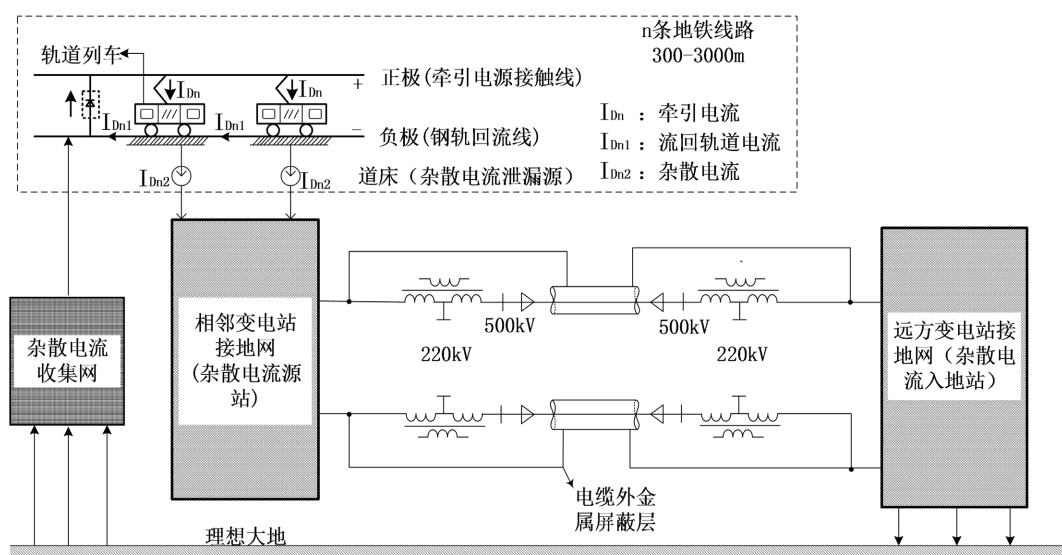


Figure 6. Schematic diagram of the principle of stray current absorption and dispersion  
图 6. 杂散电流吸收与散布原理示意图

轨道交通直流牵引系统产生的杂散电流散布流入轨道沿途的大地中后，会寻求电阻最小的导电通路流回轨道直流牵引电源的负极杂散电流收集装置。距离轨道线路 200 米到 3000 米不等的城市电网枢纽站的变压器及其输电线路具有良好接地网，同时城市中密集的地下钢筋水泥建筑，为杂散电流被吸引到电网系统并向远方散布提供了比原始土壤更好的导电通道。由图 6 可知，杂散电流首先被大量吸收到了轨道线路附近的变电站接地网，然后通过变压器线圈、输电线路(包括电缆金属外护层)向远方低密度、低电位地区传播并消散，通过各个远方站的接地网，将杂散电流送入近似于零点电位、等值电阻接近为零的理想地中，最后通过理想地将杂散电流送回轨道交通牵引系统直流电源负极杂散电流收集网络装置。

### 4. 适用于表征杂散电流对城市电网影响程度的统计方法

为进一步研究受到杂散电流影响的交流电网电力变压器直流偏磁动态变化特性，有必要对监测杂散电流数据进行统计分析。

统计一定时间段内杂散电流数据的最大值、最小值、平均值、绝对值最大值、绝对值平均值以及正负分布概率等特征值来表征杂散电流的特性。统计特征值可分别用于表征电流数据波动的范围、集中趋势、整体分布，从而进一步反映偏磁电流对变压器的最大影响以及变压器是作为杂散电流收集点或是发散点构成电网杂散电流回路通道。

以 500 千伏 JA 站 1#主变中性点杂散电流为统计对象，选取 8 个具有代表性的监测起始时刻，连续监测 5 分钟时间段内的电流数据，对各时间段内的电流数据进行统计，对比其中性点杂散电流的各个特征值，其统计结果如表 3 所示。

**Table 3.** Summary of main characteristic parameters of JA station 1# transformer  
**表 3.** JA 站 1#主变特征参数汇总表

监测起始时刻	最大值	最小值	大小差值	平均值	绝对值最大值	绝对值平均值	正值概率(%)
14:45	7.6	-28.2	35.7	-6.6	28.2	7	12.1
17:55	3.2	-30.2	33.4	-14.1	30.2	14.2	3.3
18:20	9.2	-34	43.2	-15.1	34	15.4	3.6
18:35	3.3	-38	41.3	-15.9	38	15.9	0.8
23:00	12.3	-28.6	40.9	-5.4	28.6	6.5	18.3
00:43	0.9	-0.5	1.4	0.29	0.9	0.3	-
01:20	0.5	-0.3	0.8	0.26	0.5	0.3	-
01:45	0.5	0	0.5	0.26	0.5	0.3	-

对比不同监测时刻的数据统计结果可以看出：

(1) 在 17:00 至 19:00 时间段内，JA 站 1#主变中性点测得的正值杂散电流数值与占比均较小，负值电流数值与占比均较大，在该时间段，城市轨道交通步入高峰期，偏磁电流对 JA 站 1#主变有非常明显的影响；

(2) 在 14:45 时间段以及 23:00 时间段内，JA 站 1#主变中性点测得的杂散电流的正值占比略大于高峰时段，且电流的最大正值相对较小，负值电流值相对较大，在该时间段内，城市轨道交通属于稳定运行阶段，偏磁电流对 JA 站 1#主变仍有一定的影响；

(3) 在 0:43 至 1:45 时间段内，JA 站 1#主变中性点测得的杂散电流的电流波动范围较小，在该时间段及其以后的几个小时内，城市轨道交通处于停止运行状态，产生的偏磁电流较小或未产生偏磁电流对 JA 站 1#主变造成影响。

通过对不同时间段、不同变压器使用相同的统计分析方法，得到具有代表性的特征值，对分析杂散电流对城市电网的影响程度具有重要意义，通过对监测所得的杂散电流进行统计分析所得的特征值确实表明了不同站之间的差别。

## 5. 总结

本文研究城市轨道交通杂散电流引起的变压器直流偏磁问题，依据大规模的实地监测，对相关电流数据进行统计与理论分析，得出以下几点结论：

(1) 变压器中性点杂散电流受城市轨交的运行特性影响，电流大小与列车运行密度呈正相关。

(2) 对比城市轨交的运行动态特性，变电站内各主变中性点杂散电流具有相应的波动性、间歇性以及周期性等特性。

(3) 杂散电流数值分布呈现一定的正态分布特征，杂散电流在 50% 区间内的电流总量占该监测时段内电流总量的 80%。

(4) 监测所得电流数据的统计特征值来表征杂散电流的特性，直观反映电流数据波动的范围、集中趋势以及整体分布，可以定量地分析变压器受直流偏磁影响的程度大小及不同地理位置上的变电站之间的差别。

本文的研究创新性地总结了不同监测条件下，变压器中性点杂散电流的统计分析方法，基于该统计分析发现杂散电流的相关动态特性，并在大规模监测基础上完整地分析了杂散电流在电网中的收纳、传

播、散布特性，为后续针对受轨道交通影响的变压器直流偏磁问题的研究提供了可靠的理论支撑，并为直流偏磁的治理方法提供了有效的思路。

## 基金项目

国家电网有限公司科技项目资助（项目编号：520940200013）。

## 参考文献

- [1] 陈志光, 吴聪, 秦朝葵. 轨道交通检修基地杂散电流测试分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 37-42.
- [2] 朱剑, 朱成乾. 城市轨道交通多区间杂散电流与钢轨电位分布研究[J]. 中国科技信息, 2020(11): 90-91.
- [3] 龚晓辉. 城市轨道交通供电系统杂散电流计算方法[J]. 中国科技信息, 2020(6): 74-75.
- [4] 胡颖. 城市轨道交通供电系统对电网的影响及控制[J]. 建材技术与应用, 2020(1): 38-41.
- [5] 李懿儒, 罗日成, 谭逢焘, 等. 轨道交通供电系统中变压器直流偏磁分析[J]. 上海电机学院学报, 2019, 22(1): 56-62.
- [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.
- [7] 潘卓洪, 张宣, 严雅琳, 等. 轨道交通对电力变压器不利影响的分析与防治[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(1): 35-40.
- [8] Zaboli, A., Vahidi, B., Yousefi, S. and Hosseini-Biyouki, M.M. (2017) Evaluation and Control of Stray Current in DC-Electrified Railway Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **66**, 974-980.  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2555485>
- [9] 吴晓文, 周年光, 胡胜. 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.
- [10] 肖黎, 张晶焯, 陈龙, 等. 地铁杂散电流造成的电网变压器直流偏磁特征量分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 129-134.
- [11] 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.
- [12] 蔡茂, 李佳, 彭卿, 等. 城市地区主变直流偏磁研究与处理[J]. 电气自动化, 2017, 39(1): 7-9+15.
- [13] 彭平, 曾祥君, 倪砚茹, 等. 考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 192-198.
- [14] 冯骏. 复杂运行工况下变压器直流偏磁的抑制[J]. 电气应用, 2018, 37(6): 88-93.
- [15] 蔺家骏, 郑一鸣, 杨智, 等. 地铁杂散电流对浙江电网变压器运行影响及治理措施[J]. 浙江电力, 2021, 40(7): 19-24.
- [16] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 28026.2-2018. 轨道交通 地面装置 电气安全、接地和回流 第 2 部分: 直流牵引供电系统杂散电流的防护措施[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.