

# 隔直装置安装位置对电网主变压器直流偏磁电流分布影响研究

李小鹏<sup>1</sup>, 张华杰<sup>1</sup>, 吴嘉煜<sup>2</sup>, 周文越<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**针对城市电网直流偏磁主变压器中性点安装隔直装置后,导致周围其他主变压器中性点直流增加出现直流偏磁这一现象,提出研究隔直装置安装位置对城市电网主变压器直流偏磁电流分布的影响。考虑地铁回流系统结构、换乘站综合接地系统连接特征以及地铁和城市电网空间、电气连接关系,基于CDEGS仿真软件建立西南某城市电网及地铁网络耦合模型。在此基础上,仿真分析了不同类型变电站安装隔直装置后,电网变电站主变压器直流偏磁电流幅值变化特征。分析结果表明,为地铁主变电所供电的220 kV变电站安装隔直装置后,与其直连的变电站主变压器直流偏磁电流总量减少超过15%,能够显著抑制直流偏磁电流,为城市电网变电站隔直装置安装位置确定提供理论依据。

**关键词:**隔直装置安装位置; 地铁杂散电流; 城市电网; 主变压器直流偏磁电流

**中图分类号:** TM 74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0001-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230501

## Research on Influence of Installation Position of DC Blocking Devices on DC Magnetic Bias Current Distribution of Main Transformer in Power Grid

LI Xiaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Huajie<sup>1</sup>, WU Jiayu<sup>2</sup>, ZHOU Wenyue<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** A study on the influence of installation position of DC blocking devices on DC magnetic bias current distribution of main transformer in urban power grid is proposed after the installation of DC blocking devices at the neutral point of main transformer in urban power grid, which leads to the increase of DC at the neutral point of the surrounding main transformers and the phenomenon of DC bias magnetization. By considering the structure of subway return system, the grounding system of transfer stations and the spatial and electrical connection relationship between subway and urban power grid, a coupling model of urban power grid and subway network for a city in southwest China is established based on CDEGS simulation software. On this basis, the simulation analyzes the characteristics of amplitude change of DC magnetic bias current of main transformer in grid substation after the installation of DC blocking devices in different types of substations. The analysis results show that after installing DC blocking devices in 220 kV substation supplying the metro main substation, the total DC magnetic bias current of substation which directly connected to it is reduced more than 15%, which can significantly suppress the DC magnetic bias current and provides a theoretical basis for the determination of installation position of DC blocking devices in substations of urban power grid.

**Key words:** installation position of DC blocking devices; metro stray current; urban power grid; DC magnetic bias current of main transformer

## 0 引言

地铁杂散电流入侵城市电网后,城市电网主变压器出现直流偏磁现象,造成变压器振动加剧、噪声增大,危害电网安全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。为保障电网及主变压器运行安全,电网普遍采用安装隔直装置的方式阻断直流入侵,抑制主变压器直流偏磁发生<sup>[4-6]</sup>。然而,隔直装置虽然能有效阻断流入主变压器的直流偏磁电流,但由于城市电网中存在复杂的电气拓扑结构,为直流偏磁电流流通提供多条路径,频繁导致城市电网中其他正常运行的主变压器中性点直流增加,并出现直流偏磁现象<sup>[7]</sup>。可见,隔直安装位置的选取对城市电网中直流偏磁电流分布存在一定的影响。因此,为有效抑制电网主变压器直流偏磁现象发生,有必要分析隔直装置安装位置对城市电网中主变压器直流偏磁电流的影响。

近年来,直流偏磁电流在城市电网中的分布已得到广泛研究。针对高压直流输电引起的直流偏磁电流,文献[8]考虑土壤结构,基于复镜像法计算多层水平土壤结构中的电流分布,仿真结果表明直流偏磁电流主要分布于接地极方圆 70 km 范围内的城市电网;文献[9-10]考虑高压直流输电接地极与变电站距离、变压器并联运行数量和变电站间距等因素对城市电网中主变压器直流偏磁电流分布的影响。针对地磁暴引起的直流偏磁电流,文献[11]基于 Matlab 软件建立电网等效模型,计算某电网中多座 500 kV 变电站的直流偏磁电流,仿真结果表明在电网的终点和拐角处容易诱发较大的直流偏磁电流;文献[12]探究多种高压直流输电运行方式对直流偏磁电流分布的影响,结果表明在单极大地回线和双极运行方式下可能存在直流偏磁电流,而且直流偏磁电流取决于直流极线电阻和接地极电阻等因素。针对地铁杂散电流引起的直流偏磁电流,文献[13]基于 PSCAD 仿真软件建立交流电网的杂散电流分布仿真模型,仿真分析电网中直流偏磁电流的分布,仿真结果表明直流偏磁电流主要通过电网中的输电线路传播;文献[14]总结土壤电阻率、变电站位置和变电站接地电阻和出线方式等因素对电网中直流偏磁电流分布的影响,提出对变压器中性点加装 3  $\Omega$  限流电阻时可获得较好直流抑制效果。虽然上述文献分别探究不同因素对电网中直流偏磁

电流分布影响,但是目前未有分析隔直装置安装位置对城市电网中直流偏磁电流分布影响的研究。

综上,下面考虑地铁网络结构、换乘站综合接地系统连接特征以及地铁网络和城市电网空间、电气关系,以西南某城市电网、地铁网络为研究对象,基于 CDEGS 仿真软件建立耦合模型,探究隔直装置安装位置对电网中地铁杂散电流分布的影响,为选择隔直装置安装位置提供依据。

## 1 直流偏磁电流仿真计算方法

依据电网与地铁拓扑结构、电气设备连接关系,并考虑城市电网与地铁网络之间电缆铠装层、大地之间的电气、空间耦合关系,基于 CDEGS 仿真软件建立城市电网与地铁网络耦合模型。

### 1.1 地铁模型

考虑地铁线路牵引供电系统及回流系统的拓扑结构、电气设备连接关系,建立地铁线路模型<sup>[15]</sup>。在此基础上进一步考虑地铁线路间换乘站综合接地系统电气连接特征,建立地铁网络模型。

#### 1.1.1 地铁线路模型

地铁牵引供电系统主要包括接触网、机车和牵引变电站<sup>[16]</sup>,依据接触网和牵引变电站连接关系,建立牵引供电系统模型,如图 1 所示。

地铁回流系统中全线贯通的金属结构包括轨道、排流网、贯通地线,在实际工程中它们均由多根纵向金属并联而成。依据实际工程导体连接结构特征,将轨道、排流网、贯通地线视为多电阻并联电路,并将其等效为单根纵向导体,如图 1 所示。

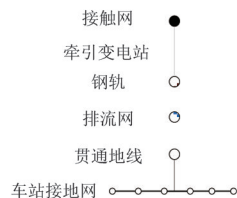


图 1 地铁线路模型

1) 钢轨:在单行地铁线路中,两根钢轨通过均流线连接组成并联结构,根据钢轨的拓扑结构和电气连接关系,可将两根钢轨等效为一根具有单根钢轨一半电阻值的钢轨导体。

2) 排流网:排流网位于钢轨正下方,由多根纵向排流条通过横向钢筋连接组成并联结构。同理,根据排流网的拓扑结构和电气连接关系,可将排流

网等效为一根排流网导体。假设纵向排流条总数为  $n$ ,则排流网导体电阻为单根排流条电阻的  $1/n$ 。

3) 车站接地网:地铁线路沿线车站的排流网下方设有接地网。根据接地网的拓扑结构和电气连接关系,可将车站接地网等效为与车站接地网具有相同接地电阻阻值的网状导体结构,其中网状导体结构的面积  $S_{cz}$  为

$$S_{cz} = 0.25\rho_d^2/R_{dw}^2 \quad (1)$$

式中: $\rho_d$ 为土壤电阻率; $R_{dw}$ 为接地网的接地电阻。

4) 贯通地线:将地铁全线贯通的 35 kV 电力电缆的铠装层视为贯通地线。由于贯通地线在地铁全线贯通并在车站位置接地,所以将其等效为一根平行于接触网且连接地铁沿线车站接地网的导体。同时,35 kV 电力电缆为三相双回线路,即贯通地线导体电阻为单根 35 kV 电力电缆铠装层电阻的  $1/6$ 。

### 1.1.2 地铁网络模型

地铁换乘站连接多条地铁线路,不同地铁线路在地铁换乘站位置都设有单独的接地网。由于车站接地网与结构钢筋等自然接地体相连,使得不同地铁线路在地铁换乘站通过结构钢筋实现接地系统电气连通<sup>[17]</sup>。

由于 CDEGS 软件导体数量有限,可通过将换乘站位置不同的地铁线路的多个接地网等效为单个接地网,如图 2 所示。由于换乘站处多个接地网属于并联关系,则换乘站接地网等效导体面积  $S_{hc}$  为

$$S_{hc} = S_{cz} \times m^2 \quad (2)$$

式中, $m$  为途经同一座换乘站的地铁线路数量。

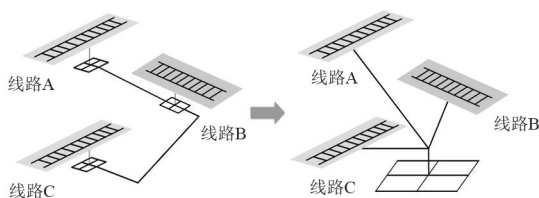


图 2 换乘站等效模型

## 1.2 电网模型

### 1.2.1 变压器模型

变压器根据绕组结构可分为自耦变压器、非自耦变压器。实际工程中,500 kV 变电站通常采用自耦变压器,220 kV 变电站通常采用非自耦变压器<sup>[18]</sup>。此外,变压器电阻主要集中在绕组位置,因此不同电压等级的变压器分别等效为与绕组相同拓扑结构的导体。

### 1.2.2 输电线模型

电网中地铁杂散电流可通过输电线、避雷线和电缆铠装层在不同变电站间流动。根据输电线、避雷线和电缆铠装层的电气连接关系,输电线等效为连接相邻变电站变压器的导体;避雷线等效为平行于输电线并且连接相邻变电站接地网的导体;电缆铠装层也等效为连接相邻变电站接地网的导体。

### 1.2.3 隔直装置模型

由于隔直装置阻断直流偏磁电流从变压器中性点位置入侵城市电网,所以隔直装置等效为变压器中性点断开与变电站接地网的电气连接。当变压器模型加装隔直装置后,变压器中性点不连接变电站接地网,即变压器中性点悬空,如图 3 所示。同时,变电站安装隔直装置即默认隔直装置的工作状态为投入。

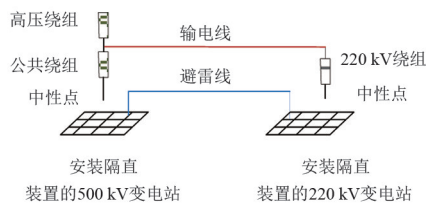


图 3 隔直装置等效模型

### 1.3 地铁网络模型和城市电网模型耦合

地铁网络模型和城市电网模型间通过土壤、电缆铠装层实现电气、大地耦合<sup>[19]</sup>。为实现地铁网络模型和城市电网模型的大地耦合,可通过将两者设置于相同的土壤模型中。

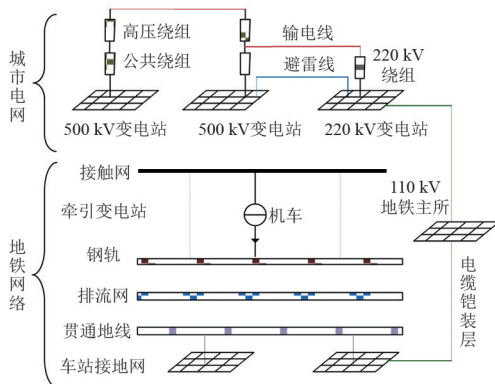


图 4 基于 CDEGS 仿真软件的耦合模型

地铁网络模型和城市电网模型间主要通过电缆铠装层实现电气耦合。220 kV 变电站为 110 kV 地铁主所供电电缆和 110 kV 地铁主所为地铁牵引变电站供电电缆在电缆首尾两端接地,使得地铁杂散电流可通过电缆铠装层从牵引变电站的接地网流入 220 kV 变电站。电缆铠装层等效为连接 220 kV 变电站接地网和地铁牵引变电站接地网的导体,该导

体电阻  $R_k$  为

$$R_k = R_{zs} + R_{zsdw} \quad (3)$$

式中,  $R_{zs}$ 、 $R_{zsdw}$  分别为 110 kV 电缆铠装层电阻和 110 kV 地铁主所接地网接地电阻。

#### 1.4 耦合建模方法应用

西南某城市共有 9 条地铁线路采用直流牵引供电, 地铁全网沿线共有 300 个车站, 其中包含 153 个牵引变电站和 40 个换乘站, 线路累加长度达到 364 km。依据该城市地铁网络结构及拓扑连接关系, 利用地铁网络建模方法搭建如图 5 所示的地铁网络模型。同时, 该城市电网包含 7 座 500 kV 变电站和 61 座 220 kV 变电站, 依据该城市电网结构及拓扑连接关系, 利用电网建模方法搭建如图 5 所示的城市电网模型。根据地铁网络和城市电网空间、电气关系, 将 22 座为地铁主所供电的 220 kV 变电站通过电缆铠装层导体与对应地铁牵引变电站接地网相连实现电气耦合, 建立城市电网与地铁网络耦合模型。同时规定耦合模型中 500 kV 变电站编号为 a1、a2、a3……; 不为地铁主所供电的 220 kV 变电站编号为 b1、b2、b3……; 为地铁主所供电的 220 kV 变电站编号为 c1、c2、c3……。

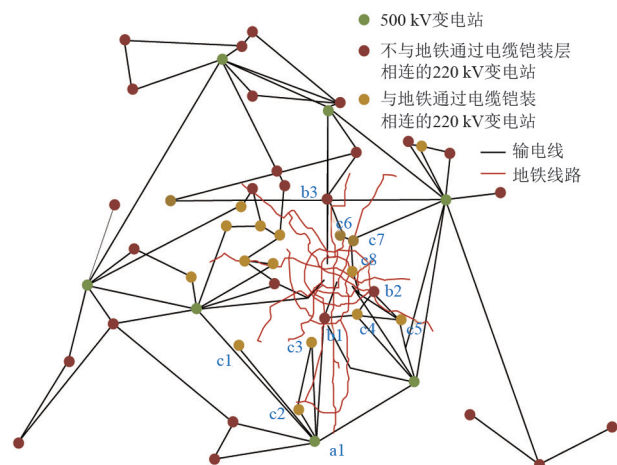


图 5 西南某城市的电网与地铁耦合模型部分拓扑结构

输电线、钢轨等设备等效过程中导体电阻率均可以在电力系统和地铁设计、施工及运行中直接或间接测量得到<sup>[17, 20-22]</sup>。耦合模型基本参数的数值如表 1 所示。

## 2 500 kV 变电站安装隔直装置对直流偏磁电流分布影响

分析在 500 kV 电压等级的变电站位置安装隔

表 1 耦合模型基本参数

等效导体	数值	等效导体	数值
500 kV 变压器 高压绕组/ $\Omega$	0.080	输电线电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.010
500 kV 变压器 中压绕组/ $\Omega$	0.030	避雷线电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.500
220 kV 变压器 绕组/ $\Omega$	0.090	接触网电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.008
牵引变电站等效 电阻/ $\Omega$	0.020	钢轨电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.040
车站接地网 面积/ $\text{m}^2$	5600	排流网电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.110
土壤电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	180	贯通地线电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.300

直装置对城市电网主变压器直流偏磁电流幅值的影响。设置耦合模型中单座 500 kV 变电站依次安装隔直装置, 以典型 500 kV 变电站 a1 为例分析。变电站 c1、c2、c3、b1 是变电站 a1 安装隔直装置后主变压器直流偏磁电流幅值变化相对较大的变电站, 仿真的结果如图 6 所示。部分输电线路电流变化情况如表 2 所示。

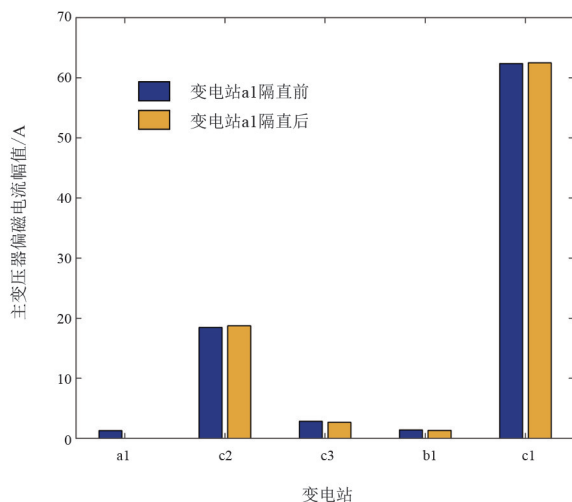


图 6 500 kV 变电站 a1 及其直连部分变电站主变压器偏磁电流幅值

由仿真结果可知, 当变电站 a1 安装隔直装置后主变压器直流偏磁电流幅值减小 1.29 A, 同时该区域变电站 c1、c2 主变压器直流偏磁电流幅值小幅抬升。在该区域电网中, 变电站 c1、c2 受到地铁杂散电流严重影响, 因此这两座变电站主变压器偏磁电流较大, 但是当变电站 a1 安装隔直装置后变电站 c2、c1 主变压器直流偏磁电流幅值仅分别增加 1.50%、0.21%。表 2 中  $I_{kc2}$ 、 $I_{kc1}$  分别为变电站 c2、c1 的电缆铠装层电流,  $I_{la1-c2}$ 、 $I_{la1-c1}$  分别为变电站 a1 和 c2、a1 和 c1 输电线电流。由表 2 可知, 当变电站

a1 安装隔直装置后变电站 c2、c1 的铠装层电流几乎不变,输电线电流分别增大 0.30 A、0.13 A。

表 2 变电站 a1 隔直前后部分输电线路电流幅值

单位:A

工况	$I_{kc2}$	$I_{kc1}$	$I_{la1-c2}$	$I_{la1-c1}$
变电站 a1 未隔直	92.76	126.62	13.46	62.36
变电站 a1 隔直	92.75	126.63	13.76	62.49

变电站 a1 与变电站 c2、c1 的输电距离分别为 23 164 m、7679 m,输电线路越长意味着线路电阻越大,所以变电站 a1 安装隔直装置只是切断变电站 c2、c1 间一条相对高阻的流电路径。然而,变电站 c2、c1 通过电缆连接相同的地铁牵引变电站,变电站 a1 隔直后地铁杂散电流仍通过电缆铠装层入侵变电站 c2、c1,使得该区域中主变压器直流偏磁电流最大的变电站 c1 电流幅值仅增长 0.21%。

变电站 b1、c1 与变电站 a1 之间输电线长度分别为 22 916 m、23 164 m,但是变电站 b1、c1 分别流入变电站 a1 抑制主变压器直流偏磁电流的 6%、9%,说明 500 kV 变电站安装隔直装置抑制的主变压器直流偏磁电流在电网重新分配比例与变电站间输电线长度没有直接关系。

综上,500 kV 枢纽变电站 a1 安装隔直装置会导致该区域中多座变电站主变压器直流偏磁电流幅值抬升,但是变电站 a1 安装隔直装置只是阻断其连接的变电站站间一条相对高阻的流电路径。

### 3 220 kV 变电站安装隔直装置对直流偏磁电流分布影响

基于建立的城市电网与地铁网络耦合模型,分别在是否为地铁主所供电的两种变电站安装隔直装置,分析对城市电网主变压器直流偏磁电流幅值的影响。

#### 3.1 不为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置

设置在耦合模型中单座不为地铁主所供电的 220 kV 变电站依次安装隔直装置,以典型变电站 b2 为例进行仿真,结果如图 7 所示。变电站 b2 通过输电线、避雷线与变电站 c4、c5 直接相连,拓扑连接结构见图 5。图 7 中  $I_{b2}$ 、 $I_{c4}$ 、 $I_{c5}$  分别为变电站 b2、c4、c5 主变压器偏磁电流, $I_{bb2-c4}$ 、 $I_{bb2-c5}$  分别为变电站 b2 和 c4、变电站 b2 和 c5 间避雷线电流。

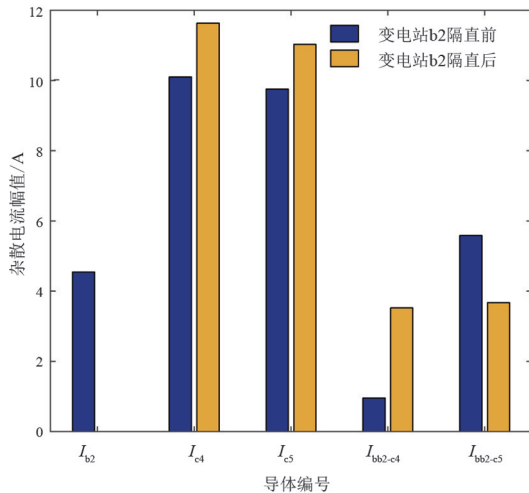


图 7 不与地铁通过电缆相连的 220 kV 变电站 b2 隔直前后的导体电流幅值

由仿真结果可知,当变电站 b2 安装隔直装置时主变压器偏磁电流幅值减小 4.54 A,与其直连的变电站偏磁电流总和减少 7.13%。在变电站 b2 隔直前后,变电站 b2 与变电站 c4、c5 间的避雷线电流幅值分别相差 4.62 A、0.15 A,说明变电站 b2 安装隔直装置后变压器不再是直流偏磁电流低阻流电路径,使得变电站 b2 两侧的避雷线电流的幅值相近。

综上,不为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置,将导致该变电站避雷线进线、出线电流幅值相近。直流偏磁电流通过避雷线流入电网中其他变电站,增加其他变电站直流偏磁风险。

#### 3.2 为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置

分别在耦合模型中为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置,以典型变电站 c6、c7 为例进行仿真,结果如图 8 和表 3 所示。变电站 c6 与变电站 c7 为相同的地铁牵引变电站供电,变电站 c6 通过输电线、避雷线与变电站 b3、c7 直接相连,同时变电站 c7 又通过输电线、避雷线与变电站 c8 直接相连,拓扑连接结构见图 5。

由图 8 可知,当变电站 c6、c7 安装隔直装置时主变压器偏磁电流幅值分别减小 25.02 A、20.89 A,变电站 c6、c7 直连变电站的主变压器偏磁电流总和分别减少 19.08%、15.69%。与地铁直连的 220 kV 变电站安装隔直装置,导致此类变电站及周围变电站主变压器偏磁电流幅值总和明显减少,抑制效果显著。由表 3 可知,在变电站 c6、c7 均未安装隔直装置、变电站 c6、c7 分别安装隔直装置 3 种工况下,电缆铠装层电流幅值总和分别为 105.55 A、103.94 A、104.15 A。当变电站 c7 安装隔直装置时变电站 c6、

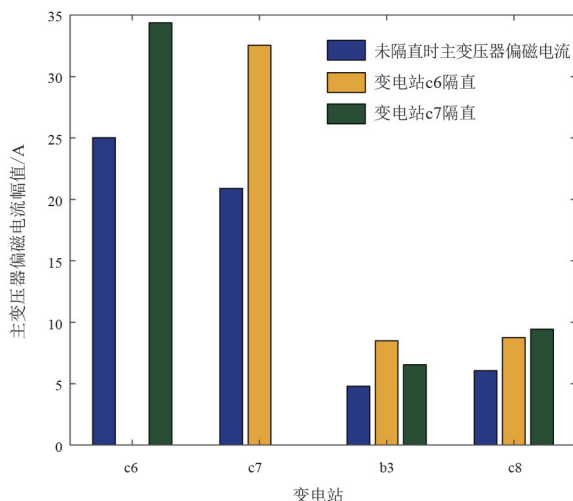


图 8 为地铁主所供电的 220 kV 变电站 c6、c7 及其附近变电站主变压器偏磁电流幅值

表 3 变电站 c6、c7 隔直前后电缆铠装层电流

工况	铠装层电流/A	
	变电站 c6	变电站 c7
变电站 c6、c7 均未隔直	51.78	53.77
变电站 c6 隔直	45.73	58.21
变电站 c7 隔直	55.09	49.06

c7 电缆铠装层电流分别增加 3.31 A、减少 4.71 A，而当变电站 c6 安装隔直装置时变电站 c6、c7 电缆铠装层电流分别减少 6.05 A、增加 4.44 A。在变电站 c6、c7 分别安装隔直装置时，电缆铠装层电流变化趋势相反，说明对于电缆铠装层连接的两侧变电站，当一侧变电站安装隔直装置会导致另一侧变电站流入更多的杂散电流。虽然与地铁通过电缆铠装层相连的 220 kV 变电站安装隔直装置时能减少一定量的电缆铠装层电流，但是与地铁直连的 220 kV 变电站位于杂散电流入侵电网的重要路径上，因此仍有大量杂散电流从该位置入侵电网。

## 4 结 论

通过搭建城市电网与地铁网络耦合模型，仿真分析隔直装置安装位置对城市电网中地铁杂散电流分布的影响。分析结果表明：500 kV 变电站安装隔直装置只是阻断其连接变电站站间一条相对高阻的流电路径，对该区域电网主变压器直流偏磁电流分布影响较小；不为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置后，在一定程度上增加该区域主变压器的直流偏磁风险；为地铁主所供电的 220 kV 变电站

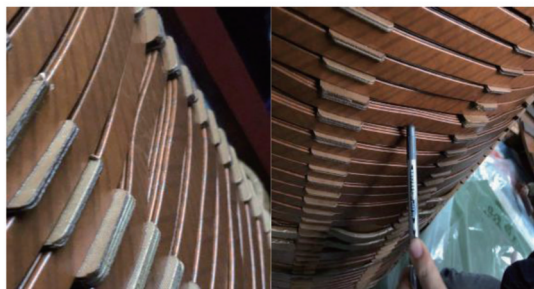
安装隔直装置后，与其直连变电站的直流偏磁电流总量减少超过 15%，抑制效果显著。综上，应重点关注为地铁主所供电且直流偏磁现象严重的 220 kV 变电站，在此类变电站安装隔直装置能有效抑制城市电网中直流偏磁电流。

### 参考文献

- [1] WANG Aimin, LIN Sheng, WU Jianzhou, et al. Relationship analysis between metro rail potential and neutral direct current of nearby transformers[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1795-1804.
- [2] 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.
- [3] 李晓华, 褚福源, 时胜寒. 轨道交通对沿线 220 kV 变电站中性点电流及振动影响[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 423-429.
- [4] 马书民, 戎子睿, 林湘宁, 等. 直流偏磁影响下继电保护的误拒动机理分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 86-98.
- [5] 樊艳芳, 耿山, 巩晓玲, 等. 基于直流偏磁风险指标的变电站选址[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 59-65.
- [6] 曹楠, 王天正, 王冬青, 等. 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 117-122.
- [7] PAN Zhouhong, ZHANG Lu, WANG Xiaomao, et al. HVDC ground return current modeling in AC systems considering mutual resistances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 165-173.
- [8] 阮羚, 全江涛, 杨小库, 等. 深层大地电阻率对交流电网直流电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3528-3536.
- [9] 阮江军, 徐闻婕, 丁志锋, 等. 基于场路直接耦合模型的交流电网直流偏磁电流分布研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1333-1340.
- [10] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 110-115.
- [11] 崔明德, 刘春明, 刘连光. 太阳风暴对四川 500 kV 电网影响的评估[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2849-2855.
- [12] 文俊, 刘连光, 项颂, 等. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 24-30.
- [13] 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]. 电网技术, 2021, 45(5): 1951-1957.



(a) 中压A相绕组



(b) 中压B相绕组

图2 主变压器解体检查情况

## 4 结 论

综上所述,变压器发生绕组变形故障的主要原

(上接第6页)

- [14] 黄华,陈璐,吴天逸,等.城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J].电网技术,2022,46(11):4524-4533.
- [15] 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.
- [16] LIN Sheng, WANG Aimin, LIU Mingjie, et al. A multiple section model of stray current of DC metro systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2021, 36(3): 1582-1593.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [18] 谷应科,李俊龙,方毅平,等.220 kV 变压器高压侧直流电阻超标原因分析及处理[J].变压器,2020,57(1):84-87.
- [19] 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

因是变压器承受短路冲击后绕组变形。返厂大修重绕绕组后,在遭受较小的短路电流的情况下,由于变压器电磁线屈服强度不满足要求而再次发生变形。

为了保证变压器安全运行,提出以下措施:1)在变压器生产阶段,严格按照取样要求对绕组线进行抽检;2)实时监测变压器遭受近区短路情况,当短路次数超过标准要求后,对变压器停电进行诊断性试验;3)通过在主变压器中、低压侧增加快速保护,减少短路冲击时间,同时完善主变压器中低压侧绝缘化改造,做好防近区短路措施。

### 参考文献

- [1] 梁振光.大型电力变压器绕组的短路强度问题[J].变压器,2003,40(8):9-12.
- [2] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会.输变电设备状态检修试验规程:DL/T 393—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.
- [3] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则:DL/T 1093—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

李 林(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事变电检修管理工作。(收稿日期:2023-06-28)

Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 114-123.

- [20] 中国电力企业联合会标准化管理中心.交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [21] 李欢,傅闯,辛清明,等.高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(19):67-79.
- [22] 俞翔,鲁江,董云龙,等.适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):174-180.

作者简介:

李小鹏(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为交直流混联电网控制保护技术;

张华杰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

吴嘉煜(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制;

周文越(1989),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护运行、检修、研发相关工作。

(收稿日期:2023-04-13)