

编者按(续) 城市轨道交通发展迅速,作为城轨列车的主要动力来源,直流牵引供电系统的安全供电技术至关重要,本刊特组织“城市轨道交通杂散电流及安全供电技术”专题,分2期刊登,上期已刊登部分文章,这期继续刊登该专题文章,以期为同类工程提供借鉴。

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.03.001

零阻变换器系统中 开关单元的优化分布方法

夏 雪, 杨晓峰, 陈茂鲁, 郑琼林, 顾靖达

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 零阻变换器系统(zero-resistance converter system, ZRCS)能将走行轨电流从虚拟回流地转移至回流线缆,进而从源头上治理城市轨道交通钢轨电位与杂散电流问题。作为 ZRCS 中影响虚拟回流地位置的关键部件之一,开关单元的数量与分布会直接影响钢轨电位和杂散电流的分布。在实际列车运行过程中,牵引和制动工况下的列车电流及相应钢轨电位远大于匀速工况;通过调整开关单元的分布,降低这部分的钢轨电位,可提高 ZRCS 的综合治理效果。因此,在分析 ZRCS 中开关单元作用的基础上,提出其优化分布方法;通过对比不同开关单元分布下的治理效果,得到较优方案。仿真结果表明:所提出的优化方法能进一步提高 ZRCS 的治理效果,具有可行性。
关键词: 城市轨道交通; 零阻变换器系统; 钢轨电位; 开关单元; 优化分布方法

中图分类号: TM 922; TM 46

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2022)03-0001-07

Optimal Distribution of a Switch Unit in a Zero-resistance Converter System

XIA Xue, YANG Xiaofeng, CHEN Maolu, ZHENG Trillion Q, GU Jingda

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: A zero-resistance converter system (ZRCS) transfers the rail current from the returning point to the return cable and mitigates the rail potential and stray current in the urban rail transit from the source. As one of the key devices, the switch unit (SU) influences the position of the returning equipoint in the ZRCS. The number and distribution of SUs directly affect the distribution of the rail potential and stray current. During actual train operation, the train current under traction and braking conditions is much larger than that under constant speed conditions, resulting in a correspondingly larger rail potential. By changing the SUs distribution, the rail potential of this part can be reduced, and the comprehensive mitigation performance of the ZRCS can be improved. Therefore, a method for optimizing SU distribution based on an analysis of the role of the SU is proposed. The optimal SU distribution was obtained by comparing the mitigation performance under different SUs distributions. The simulation results indicate that the proposed optimization method can improve the mitigation performance of the ZRCS.

Keywords: urban rail transit; zero-resistance converter system; rail potential; switch unit; optimal distribution method

收稿日期: 2021-10-21 修回日期: 2021-11-29

第一作者: 夏雪, 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在轨道交通中的应用, 20121509@bjtu.edu.cn

导师简介: 杨晓峰, 副教授, 博士生导师, xfyang@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51737001)

引用格式: 夏雪, 杨晓峰, 陈茂鲁, 等. 零阻变换器系统中开关单元的优化分布方法[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(3): 1-7.

XIA Xue, YANG Xiaofeng, CHEN Maolu, et al. Optimal distribution of a switch unit in a zero-resistance converter system[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(3): 1-7.

1 研究背景

城市轨道交通输送客流量大、方便快捷,近年来获得了迅猛发展^[1-2]。目前城市轨道交通多采用直流牵引供电系统,出于经济性考虑,走行轨通常兼作列车电流回路路径^[3-4]。然而,走行轨存在纵向电阻,列车电流流经走行轨产生与地之间的压降,即钢轨电位^[5-6];部分电流从走行轨进入大地,形成杂散电流^[7-8]。过高的钢轨电位会威胁人员安全,造成地铁停运等事故^[9];而杂散电流则会逐渐腐蚀轨道、沿线埋地金属管线等,影响其使用寿命^[10-11],因此需要采取措施加以抑制。

为限制钢轨电位,在线路中设置钢轨电位保护装置(over-voltage protection device, OVPD),钢轨电位过高时, OVPD 动作将钢轨直接接地,但会导致更多的电流泄漏^[12]。治理杂散电流的方法大致分为排流法与源头控制法^[13]:前者通过加装排流网、排流柜等设备收集杂散电流^[14-15];后者则从杂散电流产生源头出发,通过提高供电电压、增加沿线牵引所数量、增大轨道对地电阻^[16]、采用专用轨(第四轨)回流^[17]等方法,减少杂散电流。

上述措施仅适用于新建线路,且治理效果随时间逐渐下降。近年来,基于电力电子技术的硬件治理措施受到关注,即在现有供电系统结构的基础上加装电力电子设备,相对于传统治理措施治理效果好、便于维护。Fotouhi 等采用了一种吸流(Booster)电路,使走行轨回流电流经专用回流线缆转移至牵引所负极^[18]。有研究者采用基于直流自耦变压器(DC-auto transformer, DCAT)的牵引供电系统,通过 DCAT 装置将走行轨电流转移至负馈线^[19-20]。这两种措施均能从源头上治理杂散电流,但所采用的电力电子器件数目较多,且控制策略复杂。Gu 等提出了一种零阻变换器系统(zero-resistance converter system, ZRCS),在传统牵引供电系统的基础上,加装开关单元、负阻变换器、回流线缆,将走行轨电流转移至增设的回流线缆^[21]。Yang 等分析了 ZRCS 不同部件的典型故障,验证发现 ZRCS 在大多故障情形下均能降低钢轨电位^[22]。该系统器件数目较少,控制简单,不影响牵引供电系统的可靠性,便于现场安装与维护。

ZRCS 的开关单元在列车运行时切换导通时序,使走行轨电流经导通的开关单元转移至牵引所负极,且非列车所在区段的走行轨电流为零;牵引所负极和导通开关单元与走行轨连接处等电位,即为虚拟回流地。作为构造零阻回路的关键部件之一,开关单元的数量

与分布直接影响 ZRCS 中虚拟回流地的位置与走行轨回路路径长度,也改变了钢轨电位与杂散电流的分布。

然而,现有研究多假设开关单元均匀分布情况下对 ZRCS 进行分析,但在实际列车牵引曲线下,较高的钢轨电位与较大的杂散电流集中分布在列车电流较大的牵引以及制动工况下,改变虚拟回流地的分布,以缩短列车位于此两个工况内的走行轨回路路径,能够降低对应区段的钢轨电位,提高 ZRCS 的综合治理效果。

因此,笔者提出开关单元的优化分布方法。首先介绍开关单元在构造虚拟回流地与零阻回路时的作用,随后分析开关单元数量、分布优化的必要性及优化方法,最后根据典型列车运行线路对所提出的优化分布方法进行仿真验证。

2 ZRCS 工作原理

如图 1 所示, ZRCS 在传统牵引供电系统(conventional traction power system, CON-TPS)的基础上,在牵引所(traction substation, TS)负极处设置两个负阻变换器(negative resistance converter, NRC), n 个开关单元(switch unit, SU)沿线分布,经回流线缆(returning cable, RCA)连接,把走行轨划分为 $(n+1)$ 个区段。

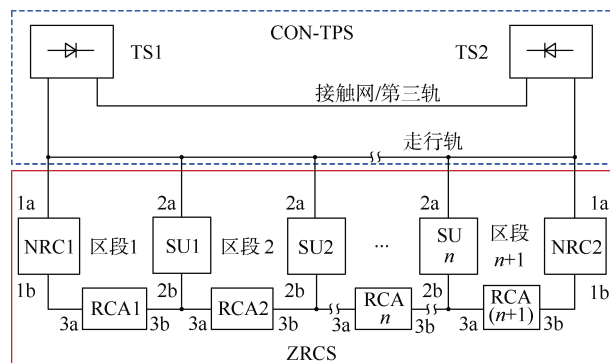


图 1 ZRCS 结构

Figure 1 Illustration of ZRCS

在本研究中,负阻变换器、开关单元的典型拓扑分别如图 2(a)、(b)所示。SU 为双向导通开关,随列车的移动,对应的 SU 切换通断状态,使得仅列车所在区段两侧的 SU 导通。NRC 为双极性输出的电力电子拓扑,根据导通的 SU 及 RCA 生成参考电压,通过控制各 IGBT 的通断输出双极性电压,实时构造零阻回路,将走行轨电流转移至牵引所负极。

如图 3 所示,以列车位于区段 k 为例($1 \leq k \leq (n+1)$, k 为正整数),SU- $(k-1)$ 与 SU- k 导通, NRC1 抵消 RCA-1~RCA- $(k-1)$ 与 SU- $(k-1)$ 的压降, NRC2 抵消

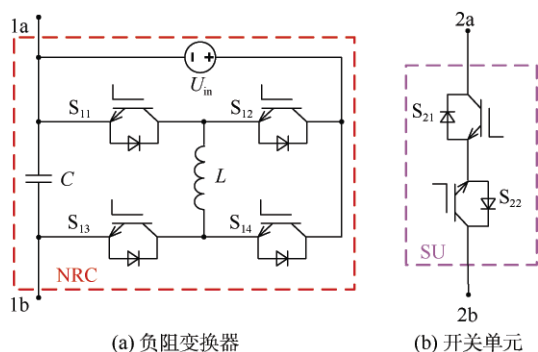


图2 关键部件拓扑

Figure 2 Topology of Key Components

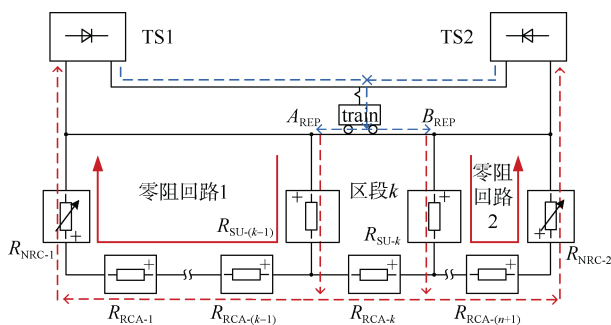


图3 列车位于区段k时ZRCS的工作原理

Figure 3 Operation principle of ZRCS when the train is in rail-section k

RCA-(k+1)~RCA-(n+1)与SU-k的压降(见式(1)); NRC1、NRC2的等效电阻与对应的RCA及SU的电阻之和为零,等效为两条零阻回路(见式(2))。具体计算如下:

$$\begin{cases} u_{zr1} = u_{NRC1} + u_{SUon-(k-1)} + \sum_{j=1}^{j=k-1} u_{RCA-j} = 0 \\ u_{zr2} = u_{NRC2} + u_{SUon-k} + \sum_{j=k+1}^{j=n+1} u_{RCA-j} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_{zr1} = R_{NRC1} + R_{SUon-(k-1)} + \sum_{j=1}^{j=k-1} R_{RCA-j} = 0 \\ R_{zr2} = R_{NRC2} + R_{SUon-k} + \sum_{j=k+1}^{j=n+1} R_{RCA-j} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{zr} 为零阻回路的等效电压, u_{NRC} 为NRC的输出电压, u_{SUon} 为SU的导通电压, u_{RCA} 为RCA的电压; R_{zr} 、 R_{SUon} 、 R_{NRC} 分别为零阻回路、SU、NRC的等效电阻, R_{RCA} 为RCA的电阻。

同时,走行轨上与导通的SU相连接处构造虚拟回流地(returning euqi-point, REP),将回流路径由整个走行轨缩短至区段k,以此减少走行轨电流泄漏,从

而降低钢轨电位。

在零阻变换器系统中,各SU的工作模式根据列车位置检测^[23]的结果确定;NRC实时采集导通SU及连接两者的RCA的压降生成参考电压,以实现零阻回路的构造。

3 开关单元优化分布

零阻变换器系统能随列车运行移动虚拟回流地的位置,将部分区段的走行轨电流转移至回流线缆,实现钢轨电位与杂散电流的降低。而开关单元作为可能的虚拟回流地的位置,其分布将会影响钢轨电位的分布。

为得到较优的开关单元分布方案,需确定SU的数量 n 。当SU均匀分布时,随着其数量的增加,回流地间的距离逐渐缩短。如图4所示, n 增加,虚拟回流地 A_{REP} 位置移动,回流路径长度 l 减小,钢轨电位也相应降低。理论上 n 越大、 l 越小,则对钢轨电位的治理效果越好,但ZRCS整体建设成本也会不断增加。

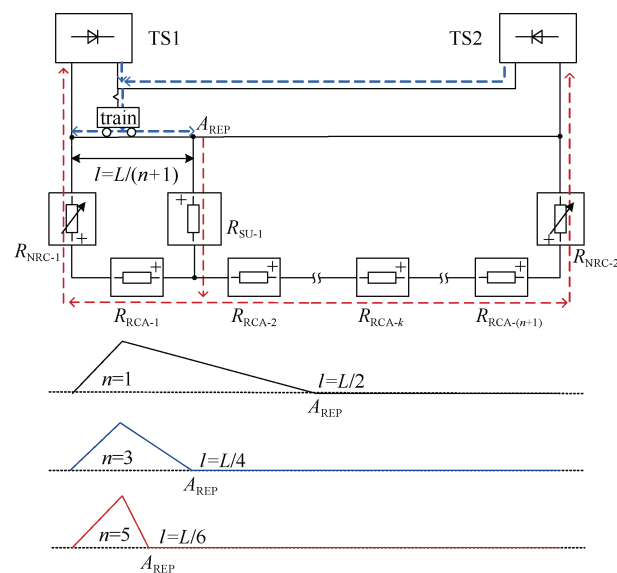


图4 不同SU数量下ZRCS的钢轨电位

Figure 4 Rail potential of the ZRCS under different quantities of SUs

在实际运行过程中,当列车处于牵引或制动工况时,相应的列车电流远大于匀速工况,导致其钢轨电位与杂散电流较大。调整此部分回流地间的距离,能降低钢轨电位,减少杂散电流,进而提高ZRCS的综合治理效果。

因此,本研究对ZRCS的开关单元数量及分布进行优化。考虑到列车运行中大部分时间处于匀速工况,所以在进行SU数量优化时,以列车牵引电流恒定为

条件, 分析 n 个 SU 均匀分布时的钢轨电位、杂散电流分布, 以确定较优的 SU 数量。

以单车情形为例的 SU 优化分布策略如图 5 所示。对 SU- k 进行位置优化时, 列车应在此 SU 两侧的区段 k 与区段 $(k+1)$ 运行, 此时 SU- k 处于工作状态, 其位置能直接影响 REP 的位置与 ZRCS 的钢轨电位分布, 对 SU 位置分布的优化才有意义。

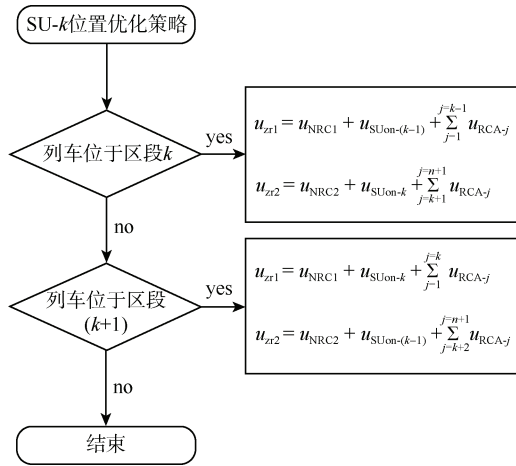


图 5 SU 优化分布策略

Figure 5 Optimal distribution strategy of the SU

无论是单车还是多车情形, 开关单元位置优化的基本方法都相同, 均通过调整 SU 的分布, 移动虚拟回流地 REP 的位置, 以改变回流路径的长度, 从而获得更优的治理效果。

为简化分析, 本研究定义平均杂散电流与作用时间的乘积, 即总泄露电量 Q_{sum} , 计算如下:

$$Q_{\text{sum}} = \int_0^T i_s dt = I_{\text{sav}} T \quad (3)$$

式中, i_s 为杂散电流, I_{sav} 为杂散电流平均值, T 为杂散电流作用时间(即列车运行时间)。

由式(3)可知, 总泄露电量的大小取决于杂散电流的大小以及杂散电流在金属结构上作用时间 T 的长短。

为了评估列车运行过程中 ZRCS 的治理效果, 定义最高钢轨电位、最大杂散电流与总泄露电量的降低百分比 η_m 、 ζ_m 与 σ_{sum} , 有

$$\begin{cases} \eta_m = \left(1 - \frac{U_{\text{rZm}}}{U_{\text{rCm}}}\right) \times 100\% \\ \zeta_m = \left(1 - \frac{i_{\text{sZm}}}{i_{\text{sCm}}}\right) \times 100\% \\ \sigma_{\text{sum}} = \left(1 - \frac{Q_{\text{Zsum}}}{Q_{\text{Csum}}}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_{rZm} 、 i_{sZm} 、 Q_{Zsum} 分别为 ZRCS 的最高钢轨电位、最大杂散电流、总泄露电量, U_{rCm} 、 i_{sCm} 、 Q_{Csum} 分别为 CON-TPS 的最高钢轨电位、最大杂散电流、总泄露电量。

4 开关单元仿真验证

4.1 数量优化

为简化分析, 作如下假设: 一是牵引所等效为恒压源, 忽略内阻及各牵引所输出电压的差异; 二是忽略电流跨区间传输对钢轨电位的影响。搭建图 1 所示的仿真模型, 依据表 1 仿真参数得到 ZRCS 的最高钢轨电位、最大杂散电流、总泄露电量降低百分比随 SU 数量 n 变化的曲线。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值
接触网电阻 $R_t/(\text{m}\Omega/\text{km})$	75
走行轨电阻 $R_r/(\text{m}\Omega/\text{km})$	18
过渡电阻 $R_g/(\Omega \cdot \text{km})$	15
回流线缆电阻 $R_{\text{ca}}/(\text{m}\Omega/\text{km})$	49
TS1 与 TS2 的距离 L/km	5
牵引所电压 u_{TS}/V	1 500
列车电流 i_{L}/A	1 667

如图 6 所示, 开关单元均分时, 随着 n 增加, ZRCS 的最高钢轨电位、最大杂散电流、总泄露电量的降低百分比呈现逐渐上升的趋势, 但最大杂散电流的降低百分比在 $n=3$ 时略有下降。这是因为回流路径中点处杂散电流较大, 且列车位于 SU 处时, 理论上该处 SU 导通即可, 但 ZRCS 中的 SU 导通策略致使该区段两侧的 SU 均导通, 造成区间中点处的杂散电流升高, 即最大杂散电流降低百分比的下降。

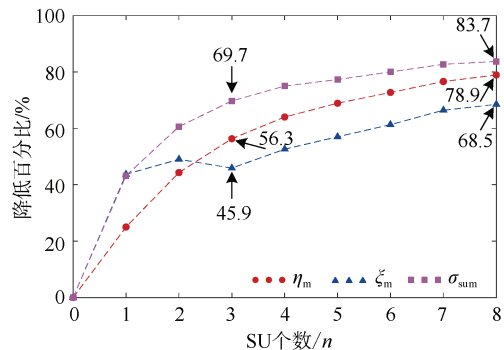


图 6 降低百分比

Figure 6 Mitigation percentage

当 SU 数量 $n > 4$ 以后,降低效果曲线已逐渐平缓,即使增大 n ,降低百分比也仅能提高 5% 甚至更小,不能充分利用 SU,反而增加了建设成本;当 $n < 2$ 时,降低效果不够理想。因此 n 取 2~4 时,能够兼顾建设成本以及治理效果,综合考虑后选取 $n=3$ 对 ZRCS 进一步分析。

4.2 优化分布

在实际列车运行线路中,通常在两个牵引所之间有一个降压所车站,列车需在此车站停站。本研究在仿真时,选取北京地铁亦庄线“荣昌东街—同济南路—经海路”路段进行分析。为简化分析,设置相邻两车站之间的距离为 2.5 km,即区间长度为 5 km,同济南路站为降压所车站,停站时间取为 30 s^[14],牵引曲线如图 7 所示,列车在两个牵引所之间完成两次“牵引-匀速-制动”的过程,且总运行时间 $T=315$ s。

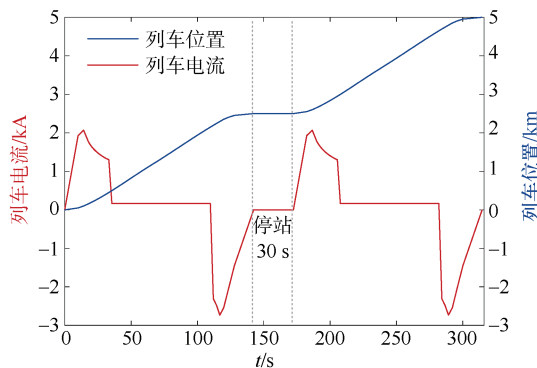


图 7 列车牵引曲线

Figure 7 Traction curve of the train

根据 SU 数量优化的结果,设置 3 个 SU 分布在 TS1~TS2 之间,将走行轨划分为 4 个区段。为兼顾整条线路的治理效果,将 SU-2 设置在 2.5 km 处,SU-1 与 SU-3 分别设置在区间中点(即降压所)两侧。

4.2.1 SU-1 位置优化

结合图 7 牵引曲线,分析列车运行于区段 1(TS1~SU-1)、区段 2(SU-1~SU-2),SU-1 位置变化时走行轨全段的最高钢轨电位、最大杂散电流及总泄漏电量降低百分比的变化趋势。

如图 8 所示,SU-1 设置于区间中点左侧 2.1~2.4 km 时,列车在此段处于电流较大的制动工况内,整体的降低效果优于其他位置。SU-1 设置在 A、B、C 三点处分别取得了最高钢轨电位、最大杂散电流以及总泄漏电量的降低百分比最大值,分别是 79%、86%、74%。在 AB 段内最高钢轨电位取得最大治理效果,曲线较为

平缓,而最大杂散电流以及总泄漏电量的降低百分比曲线斜率较大;在 BC 段内, η_m 、 ζ_m 的变化趋势均已十分缓慢,但随着 SU-1 位置的改动,总泄漏电量的降低百分比曲线增长至最大值,因此认为当 SU-1 位于 C 点,即走行轨上 2.2 km 处,能够获得较好的治理效果。

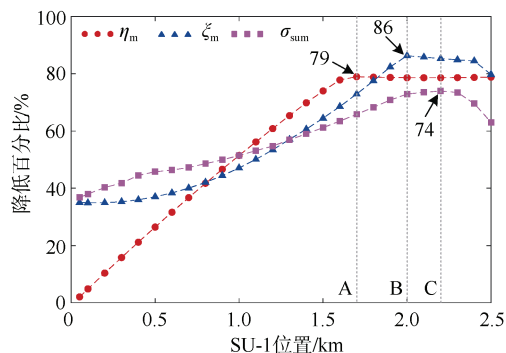


图 8 降低百分比

Figure 8 Mitigation percentage

4.2.2 SU-3 位置优化

分析列车运行于区段 3(SU-2~SU-3)、区段 4(SU-3~TS2),SU-3 位置变化时走行轨全段的最高钢轨电位、最大杂散电流以及总泄漏电量降低百分比的分布趋势。

在图 9 所示的降低百分比曲线中,SU-3 设置于区间中点右侧 2.6~3 km 时,列车在此段内处于电流较大的牵引工况,ZRCS 的整体降低效果优于其他位置。SU-3 设置于 D 点处的最高钢轨电位、总泄漏电量的降低百分比分别取得了最大值 91% 与 74%,在 E 点处的最大杂散电流取得最大降低百分比,为 82%。在 DE 段内,最高钢轨电位降低百分比曲线以较大的斜率衰减,而最大杂散电流以及总泄漏电量降低百分比曲线斜率较小,因此认为当 SU-3 位于 D 点(即走行轨上 2.8 km 处)时,能够获得较好的治理效果。

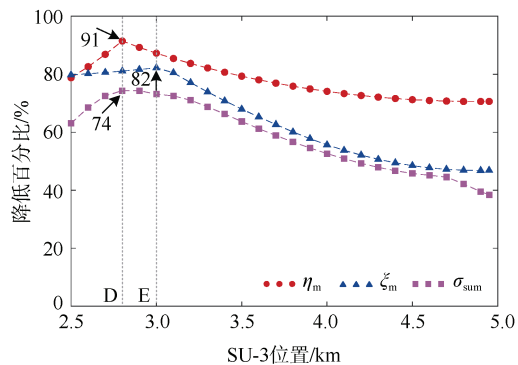


图 9 降低百分比

Figure 9 Mitigation percentage

在实际列车运行中，各线路长度不同、列车牵引曲线也不完全相同，无法做到对每一条线路进行具体的 SU 分析。考虑到列车的牵引曲线基本走势一致，对类似于本研究所分析的“荣昌东街—同济南路—经海路”路段的线路，将 SU 设置在列车电流较大的降压所附近的位置，即牵引曲线中第一个制动工况以及第二个牵引工况内，均能够获得较为理想的降低效果。

4.3 优化后的 ZRCS

根据上述优化结果，针对所分析的情形，设置 3 个 SU 分布于走行轨上 2.2、2.5 和 2.8 km 处，对 SU 优化后 ZRCS 的钢轨电位、杂散电流及总泄漏电量分布进行分析，并与 CON-TPS、SU 均分时的 ZRCS 进行对比。

CON-TPS 与 SU 优化后 ZRCS 的钢轨电位三维分布如图 10 所示。在 CON-TPS 中，回流路径的长度始终为 L ，牵引以及制动工况下的钢轨电位相比于匀速工况要高，且基本分布与列车牵引曲线的变化趋势相似。对于 SU 优化后的 ZRCS，回流路径的长度随着虚拟回流地位置的改变缩短为 $11L/25$ 、 $3L/100$ 、 $3L/100$ 和 $11L/25$ ，因此钢轨电位也整体小于 CON-TPS。

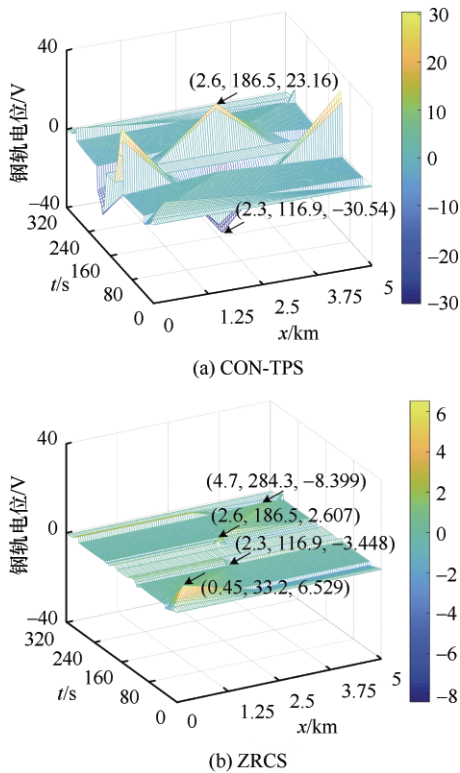


图 10 钢轨电位三维分布
Figure 10 Three-dimensional distribution of rail potential

由图 11 及表 2 可知，相比于 CON-TPS，SU 优化后，列车处于第一个制动工况(109.7~142.3 s)时，钢

轨电位的绝对值峰值降低为 3.4 V，降低了约 88.9%，杂散电流峰值降低为 0.2 A，降低了约 92%；列车处于第二个牵引工况(172.3~207.8 s)时，钢轨电位、杂散电流峰值分别降低为 2.61 V 与 0.2 A，分别降低了约 88.8%和 89.5%；总泄漏电量降低为 29.78 C，降低百分比提高至 74.7%。

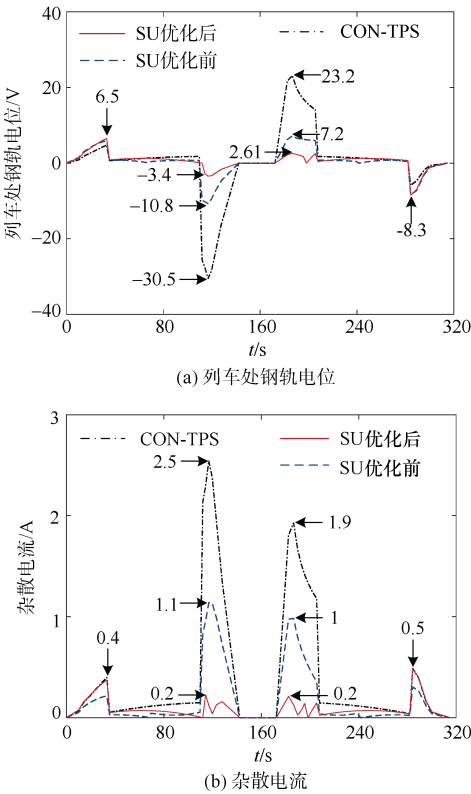


图 11 SU 优化前后的钢轨电位及杂散电流分布
Figure 11 Rail potential and stray current before and after SU optimization

表 2 总泄漏电量			
Table 2 Total leakage charge			
系统	CON-TPS	SU 优化前的 ZRCS	SU 优化后的 ZRCS
总泄漏电量/C	117.82	50.31	29.78
降低百分比/%	0	57.3	74.7

结合图 11，在 CON-TPS 与 SU 优化前的 ZRCS 中，区间中点附近为全线钢轨电位及杂散电流较高的区段，1、3 区段的钢轨电位、杂散电流峰值分别达到了 1、4 区段的 2~5 倍。优化后，SU 集中分布在区间中点附近，中点两侧制动与牵引工况下的回流路径缩短，钢轨电位及杂散电流的降低百分比均提高，如图 12 所示。但在 SU 数量一定时，走行轨上各段回流路径的长度互相关联，因此对于 2、3 区段内较高的钢轨

电位的显著降低需要牺牲 1、4 区段内的较低的钢轨电位的治理效果。

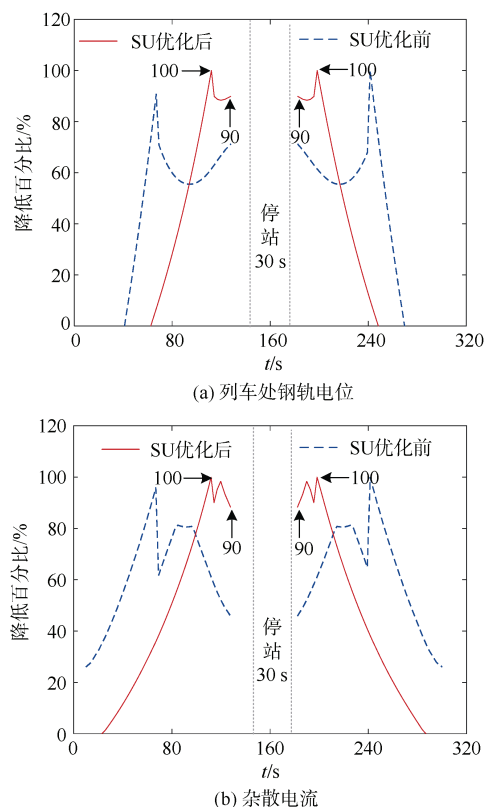


图 12 列车处钢轨电位与杂散电流的降低百分比

Figure 12 Reduction percentage of rail potential at train and stray current

5 结语

笔者在分析 ZRCS 中开关单元作用的基础上, 提出开关单元的优化分布方法, 并对其进行了仿真验证, 得到以下结论:

- 1) 开关单元数量与分布的调整相当于改变虚拟回流地的位置, 进而影响 ZRCS 的钢轨电位和杂散电流分布;
- 2) 通过优化开关单元的分布, 能显著降低列车运行至区间中点附近且牵引电流较大时的钢轨电位;
- 3) 结合典型列车运行线路验证了开关单元优化的可行性, 优化后的 ZRCS 相对于优化前不增加成本, 且显著提高了综合治理效果, 达到优化的目的。

参考文献

- [1] 韩宝明, 杨智轩, 余怡然, 等. 2020 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(1): 5-11.
HAN Baoming, YANG Zhixuan, YU Yiran, et al. Statistical

- analysis of urban rail transit operation in the world in 2020: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(1): 5-11.
- [2] YANG X, LI X, NING B, et al. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2016, 17(1): 2-13.
- [3] WHITE R D. AC/DC railway electrification and protection[C]//IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems, London, 2014: 1-42.
- [4] MARISCOTTI A, FICHERA F, OGUNSOLA A. Evaluating stray current from DC electrified transit systems with lumped parameter and multi-layer soil models[C]//Eurocon, 2013.
- [5] DU G, WANG J, JIANG X, et al. Evaluation of rail potential and stray current with dynamic traction networks in multitrain subway systems[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(2): 784-796.
- [6] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流流动模实验平台[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3609-3618.
WANG Huikang, YANG Xiaofeng, NI Menghan, et al. Rail potential and stray current dynamic emulator[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(17): 3609-3618.
- [7] 邓霄, 贾猛, 林飞, 等. 全功率双向变电站与地铁杂散电流问题[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(5): 142-147.
DENG Xiao, JIA Meng, LIN Fei, et al. Full-power bidirectional substation and the problem of subway stray current[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(5): 142-147.
- [8] ZABOLI A, VAHIDI B, YOUSEFI S, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(2): 974-980.
- [9] 唐靖坤, 刘炜, 王沛沛, 等. 单向导通装置和钢轨电位限制装置对钢轨电位影响的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 87-91.
TANG Jingkun, LIU Wei, WANG Peipei, et al. Simulation of the track unilateral connecting device and over-voltage protection device influence on rail potential[J]. Urban mass transit, 2020, 23(1): 87-91.
- [10] YANG X, XUE H, WANG H, et al. Stray current and rail potential simulation system for urban rail transit[C]//IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shenzhen, 2018: 1-6.
- [11] 靳凯. 轨道交通杂散电流对埋地金属管线的影响及应对措施[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 199-201.
JIN Kai. Influence of urban rail transit stray current on buried metal pipeline and countermeasures[J]. Urban mass transit, 2021, 24(05): 199-201.
- [12] CHEN Z, KOLEVA D, Van BREUGEL K. A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure[J]. Corrosion reviews, 2017, 35(6): 397-423.
- [13] 李国欣, 吴培林, 裴文龙. 钢轨电位与杂散电流综合抑制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(4): 56-62.
LI Guoxin, WU Peilin, PEI Wenlong. Research on integrative suppression of rail potential and stray current[J]. Urban mass transit, 2017, 20(04): 56-62.

(下转第 16 页)

- transit systems[J]. IEEE electrification magazine, 2014, 2(3): 22-31.
- [10] ZABOLI A, VAHIDI B, YOUSEFI S, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(2): 974-980.
- [11] 徐杰, 杨晓峰, 王慧康, 等. 一种多区段地铁轨道电位动态模拟系统[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 57-65.
XU Jie, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, et al. A multi-section metro rail potential dynamic emulator system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 57-65.
- [12] 杨晓峰, 王慧康, 郑琼林. 直流牵引供电系统中有限边界边缘效应对轨道电位的影响[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 1-11.
YANG Xiaofeng, WANG Huikang, ZHENG Trillion Q. Influence of finite boundary fringe effect on the rail potential in DC traction power supply system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 1-11.
- [13] COTTON I, CHARALAMBOUS C, AYLOTT P, et al. Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2005, 54(2): 722-730.
- [14] DU G, ZHANG D, LI G, et al. Maximum safety regenerative power tracking for DC traction power systems[J]. Multi-disciplinary digital publishing institute, 2017, 10(2).
- [15] WANG M, YANG X, WANG L, et al. Resonant switched capacitor converter based DC auto-transformer for urban rail transit[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Texas: IEEE, 2018: 1441-1446.
- [16] 郑琼林, 杨晓峰, 游小杰. 城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(3): 91-97.
ZHENG Trillion Q, YANG Xiaofeng, YOU Xiaojie. DC auto-transformer based traction power supply system for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(3): 91-97.
- [17] FOTOUHI R, FARSHAD S, FAZEL S S. A new novel DC booster circuit to reduce stray current and rail potential in DC railways[C]// Compatibility and Power Electronics (CPE). Badajoz: IEEE, 2009: 457-462.
- [18] FABRE J, LADOUX P, SOLANO E, et al. MVDC three-wire supply systems for electric railways: design and test of a full sic multilevel chopper[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(6): 5820-5830.
- [19] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流动态实验平台[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3609-3618.
WANG Huikang, YANG Xiaofeng, NI Menghan, et al. Rail potential and stray current dynamic emulator[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(17): 3609-3618.
- [20] GU J, YANG X, ZHENG T Q. Influence factors analysis of rail potential in urban rail transit[J]. Microelectronics reliability, 2018, 88-90.
- [21] 杜贵府, 张栋梁, 王崇林, 等. 直流牵引供电系统电流跨区间传输对轨道电位影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 129-139.
DU Guifu, ZHANG Dongliang, WANG Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(11): 129-139.

(编辑: 王艳菊)

(上接第7页)

- [14] 裴潇湘. 加设排流网情况下杂散电流场仿真分析[J]. 电气化铁道, 2017, 28(4): 71-74.
PEI Xiaoxiang. Simulation and analysis of stray current adding with stray current drainage network[J]. Electric railway, 2017, 28(4): 71-74.
- [15] CHARALAMBOUS C A, COTTON I, AYLOTT P. Modeling for preliminary stray current design assessments: the effect of crosstrack regeneration supply[J]. IEEE transactions on power delivery, 2013, 28(3): 1899-1908.
- [16] 顾靖达, 杨晓峰, 郑琼林, 等. 基于不同接地方式与列车工况的负阻变换器牵引供电系统轨道电位与杂散电流[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1703-1717.
GU Jingda, YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, et al. Rail potential and stray current on negative resistance converter traction power system under different grounding schemes and train conditions[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(8): 1703-1717.
- [17] RAHMAN F A A, KADIR M Z A A, OSMAN M, et al. Review of the AC overhead wires, the DC third rail and the DC fourth rail transit lines: issues and challenges[J]. IEEE access, 2020, 8: 213277-213295.
- [18] FOTOUHI R, FARSHAD S. A new novel power electronic circuit to reduce stray current and rail potential in DC railway[C]//IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, 2008: 1575-1580.
- [19] WANG M, YANG X, ZHENG T Q, et al. DC autotransformer-based traction power supply for urban transit rail potential and stray current mitigation[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2020, 6(2): 762-773.
- [20] 郑琼林, 杨晓峰, 游小杰. 城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(3): 91-97.
ZHENG Trillion Q, YANG Xiaofeng, YOU Xiaojie. DC auto-transformer based traction power supply system for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(3): 91-97.
- [21] GU J, YANG X, ZHENG T Q, et al. Negative resistance converter traction power system for reducing rail potential and stray current in the urban rail transit[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2021, 7(1): 225-239.
- [22] YANG X F, GU J D, ZHENG T Q. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system[J]. Microelectronics reliability, 2020, 114.
- [23] GU J D, YANG X F, ZHENG T Q, et al. Rail potential and stray current mitigation for the urban rail transit with multiple trains under multiple conditions[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2022, 8(2): 1684-1694.

(编辑: 王艳菊)