

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.02.004

零阻变换器系统中晶闸管 开关单元的关断策略

陈茂鲁, 杨晓峰, 郑琼林, 赵治钧, 夏 雪, 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)是一种治理城市轨道交通杂散电流的电力电子方案, 开关单元作为其关键部件之一, 用于将高达数千安的牵引电流由走行轨转移至回流线缆。鉴于绝缘栅双极型晶体管 IGBT 开关单元面临的损耗与可靠性挑战, 在 ZRCS 中采用了晶闸管开关单元(silicon controlled rectifier switch unit, SCR-SU), 但面临着晶闸管无法自关断的问题。因此在分析 SCR-SU 关断机理的基础上, 从 ZRCS 系统角度提出了利用负阻变换器实现强制换流的 SCR-SU 关断策略。仿真和实验结果表明, 采用 SCR-SU 的零阻变换器系统能够在关断策略下实现晶闸管的关断, 并能有效降低城市轨道交通系统的杂散电流, 具有良好的应用前景。

关键词: 城市轨道交通; 零阻变换器系统; 杂散电流; 晶闸管; 开关单元; 关断策略

中图分类号: TM 922; TM 46

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2022)02-0025-09

Turn-off Strategy of SCR Based Switch Unit in Zero-Resistance Converter System

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

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

Abstract: Zero-resistance converter system (ZRCS) is a power-electronic-based stray current mitigation measure for urban rail transit. Switch unit (SU), as one of the key devices, transfers thousands of amperes of traction current from the running rails to the return cable. To address the challenges of loss and reliability for the insulated gate bipolar transistor (IGBT)-based SU, this study employs a silicon-controlled rectifier switch unit (SCR-SU) in the ZRCS. However, an SCR-SU faces a turn-off problem. Based on the analysis of the SCR-SU turn-off mechanism, an SCR-SU turn-off strategy with a negative resistance converter from the system aspect is proposed. Simulation and experimental results indicate that the SCR-SU in ZRCS can be turned off by adopting the proposed SCR-SU turn-off strategy. With its normal operation, the ZRCS with SCR-SU can effectively reduce the stray current in urban rail transit systems and has good application prospects.

Keywords: urban rail transit; zero-resistance converter system (ZRCS); stray current; silicon controlled rectifier (SCR); switch unit (SU); turn-off strategy

城市轨道交通具有运量大、安全环保等优点, 近年来获得了快速发展。截至 2021 年底, 我国内地城市

轨道交通累计运营里程达 9 192 km^[1]。在城市轨道交通采用的直流牵引供电中, 走行轨通常兼作列车牵引

收稿日期: 2021-10-31 修回日期: 2021-12-15

第一作者: 陈茂鲁, 男, 硕士研究生, 从事电力电子技术在轨道交通中的应用研究, 20121418@bjtu.edu.cn

通讯作者: 杨晓峰, 男, 副教授, 博士生导师, 从事轨道交通杂散电流治理应用研究, xfyang@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51737001); 北京市自然科学基金(3222054)

引用格式: 陈茂鲁, 杨晓峰, 郑琼林, 等. 零阻变换器系统中晶闸管开关单元的关断策略[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 25-33.

CHEN Maolu, YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, et al. Turn-off strategy of SCR based switch unit in zero-resistance converter system[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 25-33.

电流的回流路径。一方面,由于走行轨纵向电阻的存在,轨地之间存在电位差,即轨道电位;另一方面,走行轨与大地之间并非完全绝缘,部分电流会泄漏至大地中,形成杂散电流^[2-6]。

过高的轨道电位会危及人员安全,而钢轨电位保护装置动作会强制将牵引所接地,进而造成更多的杂散电流泄漏^[7]。杂散电流会对沿线的地下金属管道产生电化学腐蚀^[8-9],造成管道腐蚀穿孔,因此在城市轨道交通的建设和运维中需要对杂散电流进行防护。

杂散电流治理方法通常包括“源控法”和“排流法”。前者通过提高系统电压等级、缩小牵引所(traction substation, TS)间距、采用双边供电等方法降低走行轨回流电流的幅值;后者则通过排流网和排流柜为杂散电流提供一个低阻抗通道回流牵引所^[3, 10-12]。这些方法通常在线路建设的过程中实施,但对既有线路的改造和维护难度大,且治理效果随时间衰减。而通过加装电力电子设备来治理杂散电流则无需改变原有系统结构,且便于维护,成本可控。文献[13-14]通过沿线设置升压电路供列车牵引电流回流;文献[15]则采用直流自耦变压器牵引供电系统改变牵引电流回流路径;二者均通过电力电子装置缩短等效供电距离的方法抑制杂散电流的泄漏,但由于隧道内安装空间有限,沿线路安装的电力电子设备体积也会受限。

为此,文献[16]提出了用于治理杂散电流的零阻变换器系统(zero-resistance converter system, ZRCS),仅在牵引所安装电力电子设备,而沿线的开关单元(switch unit, SU)体积较小,便于现场安装。文献[17]在系统建模的基础上,对比了不同SU控制策略下ZRCS的杂散电流治理效果。文献[18]则讨论了ZRCS中关键部件的典型故障机理。文献[19]分析了在不同牵引所接地方式与列车运行工况下ZRCS的杂散电流抑制效果。

ZRCS开关单元为双向开关,需要根据列车运行区段实时切换,从而将特定区段的走行轨回流转移至外加专用回流线缆,是ZRCS正常工作的关键部件之一。列车牵引电流通常高达数千安培,因此SU需要具有良好的通流能力与可靠性。

既有文献采用的IGBT-SU由两个IGBT反向串联组成,其通态压降较高,导致大电流时产生通态损耗问题;且IGBT的过流能力与耐受浪涌电流能力差,面对牵引供电系统大电流负荷波动易出现过热损坏,影响ZRCS的可靠运行。为此本文提出了由两个晶闸管反向并联组成的晶闸管开关单元(silicon controlled

rectifier switch unit, SCR-SU),其通态压降小于IGBT-SU的串联结构。考虑到开关单元损耗与其通态压降成正比,SCR-SU相较于IGBT-SU在损耗方面更具优势,且晶闸管在面对浪涌电流时具有可靠性的优势,更适合ZRCS的应用。然而,由于晶闸管的半控特性,只能控制其开通,无法控制其关断,这将影响ZRCS正常运行,而外加强制换流电路则会引入额外的辅助硬件电路,造成开关单元体积与成本的增加。为此本文提出了通过负阻变换器对SCR-SU进行强制换流的关断策略。

本文首先分析了零阻变换器系统的工作原理,接着在SCR-SU关断机理分析基础上,提出了基于负阻变换器实现晶闸管强制换流的SCR-SU关断策略,最后通过仿真和硬件实验平台,对本文所提出的晶闸管开关单元在ZRCS中的应用、SCR-SU关断策略的有效性及其可行性进行了仿真与实验验证。

1 零阻变换器系统的工作原理

ZRCS的结构如图1所示,在传统牵引供电系统(conventional traction power system, CON-TPS)的牵引所、接触网(或第三轨)与走行轨的基础上,并联安装了负阻变换器(negative resistance converter, NRC)、开关单元(SU)和回流线缆(return cable, RCA)。

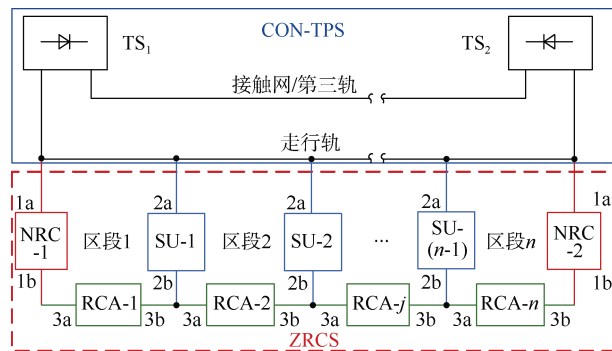


图1 ZRCS结构示意图

Figure 1 Illustration of ZRCS

在ZRCS中,SU为双向可控开关,其拓扑如图2所示;NRC为双极性输出的电力电子设备,其典型拓扑如图3所示。两个NRC与 $(n-1)$ 个SU将 TS_1 与 TS_2 之间的供电区间划分为 n 个区段。根据列车所在区段控制SU的通断,由NRC输出电压抵消回流线缆与导通SU的压降,即NRC等效输出电阻为负,构建等效零阻回路转移走行轨回流电流,从而缩短走行轨的回流距离,降低轨道电位与杂散电流^[16]。

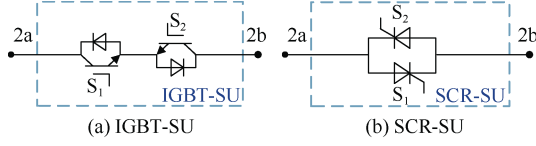


图2 SU拓扑
Figure 2 SU Topologies

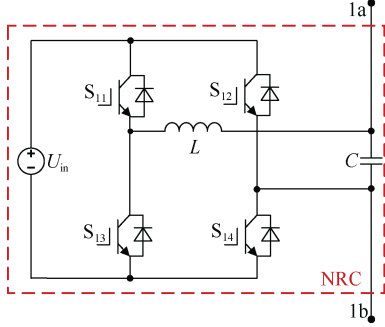


图3 NRC拓扑
Figure 3 NRC Topology

图4为ZRCS整体控制逻辑，包括SU控制逻辑与NRC控制逻辑。首先根据列车所在位置选择对应的SU开通，具体的列车位置检测方案可使用列车位置检测装置^[20]。其次根据SU的导通情况，控制NRC使牵引所处与导通SU处电位差为零。由NRC、RCA与SU共同构建的零阻回路供列车牵引电流回流，在无列车运行的走行轨区段则无电流流过^[16]。

如图5所示，以列车位于区段 k 为例，此时 $SU-(k-1)$ 与 $SU-k$ 导通，NRC-1和NRC-2输出电压满足式(1)。式(2)为此时NRC-1和NRC-2构建的两条零阻回路电压，其电压幅值均为零，即等效电阻均为零，NRC表现为抵消回流线缆电阻的负电阻值。

$$\begin{cases} u_{NRC-1} = -\left(\sum_{i=1}^{k-1} u_{RCA-i} + u_{SU-(k-1)}\right) \\ u_{NRC-2} = -\left(\sum_{i=k+1}^n u_{RCA-i} + u_{SU-k}\right) \end{cases} \quad (1)$$

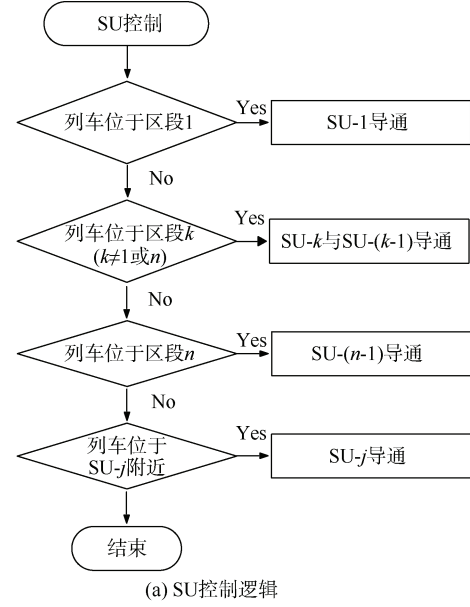
式中， u_{NRC-1} 为NRC-1输出电压， u_{NRC-2} 为NRC-2输出电压， u_{RCA-i} 为RCA- i 两端电压， u_{SU-k} 为 $SU-k$ 导通压降。

$$\begin{cases} u_{zeroloop_1} = u_{NRC-1} + u_{SU-(k-1)} + \sum_{i=1}^{k-1} u_{RCA-i} = 0 \\ u_{zeroloop_2} = u_{NRC-2} + u_{SU-k} + \sum_{i=k+1}^n u_{RCA-i} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

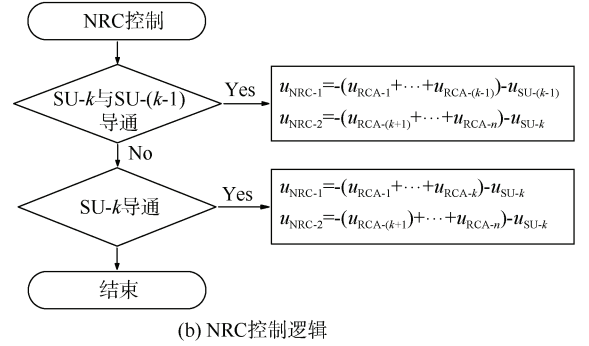
式中， $u_{zeroloop_1}$ 为构建的零阻回路1电压， $u_{zeroloop_2}$ 为构建的零阻回路2电压。

开关单元(SU)作为分布在隧道内的双向开关，导通与关断跟随列车运行周期，切换频率极低。考虑到

机械开关电气寿命较短，电力电子开关更为合适。对于隧道内的有限空间，为降低流过电流的开关单元导通损耗、降低热损耗管理难度，应选择通态压降相对较低的器件与拓扑结构。相较于其他电力电子器件，晶闸管具有成本低、开通损耗低、电流应力大、驱动简单等优势，但存在无法自关断的问题。接下来本文针对SCR-SU中晶闸管的关断问题开展进一步研究。



(a) SU控制逻辑



(b) NRC控制逻辑

图4 ZRCS整体控制逻辑
Figure 4 Overall control logic of ZRCS

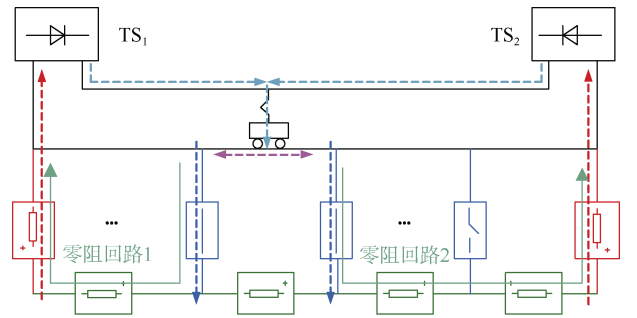


图5 列车位于区段 k 的示意

Figure 5 Schematic of the train in section k

2 SCR-SU 的关断机理

晶闸管开通时,为其门极施加正向驱动电压脉冲,当其阳极与阴极之间承受正向电压时,晶闸管开通。而晶闸管关断时,除了晶闸管门极需要施加零电压或负压外,还需将流过晶闸管的电流幅值降至维持电流以下^[21]。

当 ZRCS 正常工作时,开关单元 SU 需随着列车运行实时切换,但由于晶闸管的半控特性,只能控制 SCR-SU 的开通,无法控制其关断,而开关单元的异常导通将影响 ZRCS 的正常工作。

当列车的运行工况由牵引或惰行工况转为制动工况时,列车的牵引电流由正变负,在关断相应触发脉冲的条件下,迫使流过 SU 的电流由正值下降至零,即实现 SCR-SU 的自关断。同理,若列车由制动工况转为牵引或惰行工况时,列车的牵引电流由负变正,可实现 SCR-SU 的自关断。但是,当列车以单一工况运行时,则列车牵引电流的方向不发生变化,若流过 SCR-SU 的电流无法降至维持电流以下,则会出现 SCR-SU 无法自关断的问题,影响 ZRCS 零阻回路的构建。ZRCS 通过 SU 将原本走行轨上的回流电流转移至回流线缆,而无法自关断的 SU 相当于在原有的零阻回路基础上额外构建了一条短路回路,如图 6 所示。对于负阻变换器,这条短路回路相当于额外并联了一个小电阻负载,使得负阻变换器输出电流大幅度增加,向走行轨“注入”电流,这与 ZRCS 构建零阻回路从而减少走行轨回流幅值的基本思路相悖,因此必将影响 ZRCS 对杂散电流的治理效果,且给负阻变换器的安全运行带来威胁。

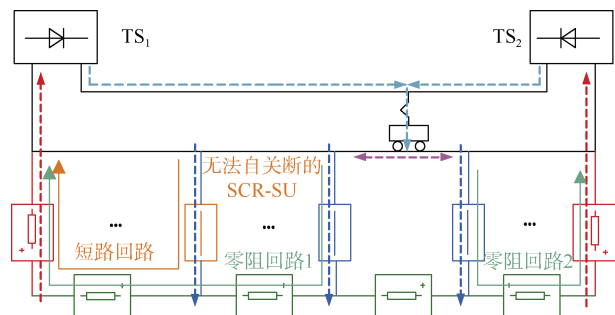


图 6 无法自关断的 SCR-SU 示意

Figure 6 Schematic of SCR-SU that cannot be turned off

在直流应用中,常用外加强制换流电路的晶闸管强制关断方法^[22];但外加的强制换流电路额外引入的硬件电路会大大增加 SU 复杂程度与体积,不利于在隧道的狭小空间内安装。尽管切换列车运行工况无需

改变 SCR-SU 结构即可关断晶闸管,但列车的实际运行情况无法保证与开关单元的切换匹配。

综上所述,无法自关断的 SCR-SU 会影响 ZRCS 的正常运行。切换列车工况和外加强制换流电路的 SCR-SU 关断方法在实际应用中适应性差。为保证 ZRCS 中 SCR-SU 的正常投切,需采取其他关断策略来保证 SCR-SU 的可靠关断。

3 基于负阻变换器的 SCR-SU 关断策略

针对上述关断策略的不足,本文提出了在零阻变换器系统中基于负阻变换器的 SCR-SU 关断策略(简称“SCR-SU 关断策略”),控制 NRC 参与晶闸管的强制换流过程,其原理如图 7 所示。

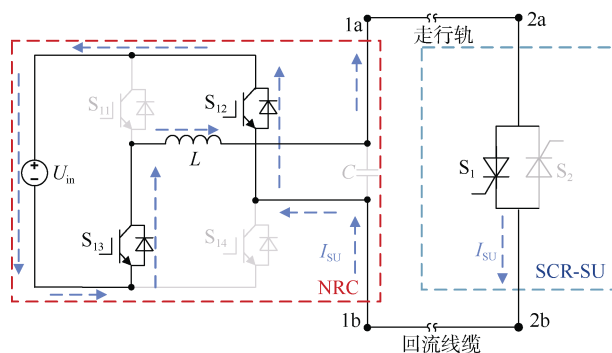


图 7 利用 NRC 强制换流原理

Figure 7 Principle of NRC forced commutation

在对 SCR-SU 门极施加零电压或负电压之后,通过 NRC 电源侧吸收无法自关断的 SCR-SU 支路的功率,从而利用 NRC 为 SCR-SU 提供一个反压,实现 SCR-SU 的强制换流关断,即控制图 7 中 S_{12} 与 S_{13} 导通, S_{11} 与 S_{14} 关断,使加在开关单元内晶闸管 S_1 两端(2a 与 2b 之间)电压为一负值。为保证 SCR-SU 中的晶闸管可靠关断的同时, NRC 输出电压不下降至一个过低的负值,控制 NRC 输出零电压或反压。

在 NRC 参与强制换流期间, NRC 无法抵消回流线缆与开关单元的等效电阻,为减小走行轨的回流,零阻回路的等效电阻应尽可能小,即 NRC 输出电压为零时对杂散电流治理效果是最优的,故接下来本文仅讨论 NRC 输出零电压的情况。考虑到 SCR-SU 关断策略的持续时间只需要保证晶闸管完成换流关断,而快速型晶闸管的关断时间通常小于 $100\ \mu\text{s}$ 。开关单元的切换周期一般与列车运行周期接近,故在保证负阻变换器动态响应速度的条件下,利用 NRC 强制换流关断 SCR-SU 耗时占比相对于列车运行周期可近似

忽略不计,即 SCR-SU 关断策略不会对 ZRCS 的正常工作造成显著影响。

图 8 为 SCR-SU 关断策略控制框图,当 ZRCS 正常工作时,由两个 NRC 构建两条零阻回路,即最多同时开通两个 SU,如 SU-($k-1$)与 SU- k 。若关断靠近 NRC-1 的 SU-($k-1$),则由 NRC-1 参与强制换流;同理,若关断靠近 NRC-2 的 SU- k ,则由 NRC-2 参与强制换流。当 ZRCS 仅一个 SU 导通时,如 SU- k ,若 SU- k 更靠近 NRC-1,即 $k < n/2$,则由 NRC-1 参与强制换流,反之则由 NRC-2 参与强制换流。当 ZRCS 中一个 NRC 参与 SCR-SU 强制换流时,另一 NRC 保持正常给定输出,则不影响另一条零阻回路的构建,即 SCR-SU 关断策略不会影响 ZRCS 其余部分的正常运行。

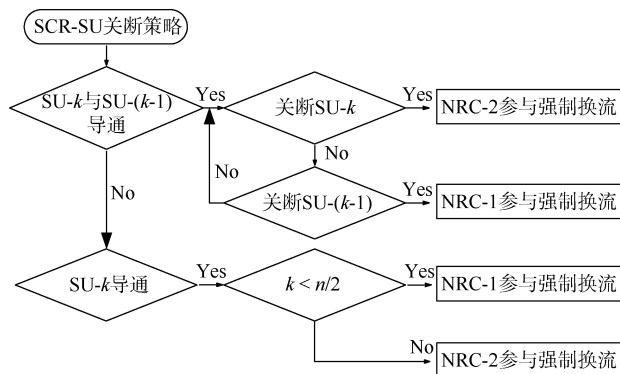


图 8 SCR-SU 关断策略

Figure 8 Turn-off strategy of SCR-SU

综上所述,本文的 SCR-SU 关断策略能够在保证列车与 ZRCS 正常运行的同时关断 SCR-SU。

4 仿真与实验验证

4.1 仿真实验

本节搭建了图 1 所示的 ZRCS 仿真模型,牵引所采用悬浮接地方式,表 1 为仿真参数。为简化分析,一辆列车从 TS₁ 处以恒流牵引运行至 TS₂ 处, SU-1、SU-2、SU-3 分别位于 $x=1.25$ km, $x=2.5$ km, $x=3.75$ km, 将 5 km 的供电区间平均分为 4 个区段。

如图 9 所示,若不对 SCR-SU 采取强制关断,即不采用 SCR-SU 关断策略,随着列车运行,尽管列车已经进入第 3 区段, SU-1 在理想情况应关断,但流过 SU-1 的电流始终大于零,即 SU-1 无法自行关断。

以列车位于 3.125 km 处为例,此时 SU-1 应关断, SU-2 与 SU-3 导通。假设 SU-1 最初因无法自关断而处于开通状态,在 t_1 时刻关断 SU-1,即采用 SCR-SU 关断策略, NRC-1 参与强制换流关断 SU-1, SU-1 的

关断过程如图 10 所示; t_2 为 NRC-1 恢复正常给定电压输出时刻,其中 NRC 输出电压对应于图 1 中 1a 与 1b 两端电压, SU 电流对应于 2a 流向 2b 电流。

表 1 系统参数

Table 1 Parameters of system

参数	数值
接触网电阻 $R_l/(m\Omega/km)$	75
走行轨电阻 $R_r/(m\Omega/km)$	18
过渡电阻 $R_g/(\Omega \cdot km)$	15
回流线缆电阻 $R_{ca}/(m\Omega/km)$	49
TS ₁ 与 TS ₂ 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
区段数量 n	4

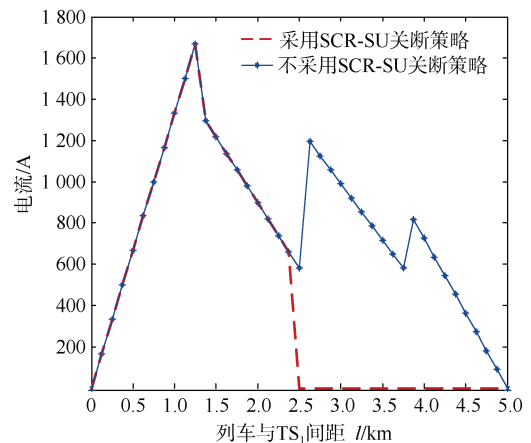


图 9 SU-1 电流

Figure 9 SU-1 current

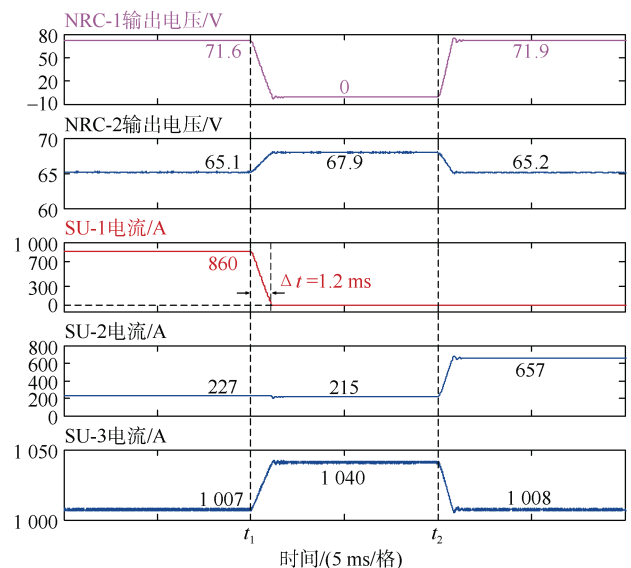


图 10 SU-1 关断过程

Figure 10 Turn-off process of SU-1

采用图8所示的SCR-SU关断策略之前, SU-1、SU-2与SU-3流过的电流之和达到2 094 A,超过了列车牵引电流的1 667 A,这说明此时由于SU-1的异常导通,构造了一条短路回路使NRC-1输出电流增加,向走行轨额外注入了部分电流。

随着NRC-1输出电压降至零,即开始参与SCR-SU的强制换流, SU-1原开通的晶闸管由NRC-1电源侧强制换流关断,此过程仅耗时1.2 ms。在NRC-1输出电压保持为零期间,流过SU-2的电流幅值没有太大变化,流过SU-3的电流与NRC-2的输出电压有所增加,但增幅较小在5%以下。此时流过SU-2与SU-3的电流之和小于列车牵引电流1 667 A,这是因为此时由NRC-1、SU-2与回流线缆构成的零阻回路等效为一正电阻并联在走行轨上,部分牵引电流需要通过走行轨回流至牵引所。

当NRC-1恢复正常工作后, SU-1已经可靠关断,流过SU-2与SU-3的电流之和接近列车牵引电流1 667 A,此时ZRCS恢复正常运行,列车的大部分牵引电流通过由ZRCS构建的两条零阻回路回流至两侧的牵引所。因此SCR-SU关断策略的正确性得到验证。

图11为采用SCR-SU关断策略前后的ZRCS轨道电位分布,根据式(3)和(4)可计算采用SCR-SU关断策略前后的杂散电流总量分别为522.9 mA和243.4 mA,其中 S_1 和 S_2 分别为图11中红色和蓝色阴影部分面积。采用SCR-SU关断策略之前,轨道电位的最大值从7.726 V增加至10.13 V,增加了31.1%,杂散电流增加了114.8%。

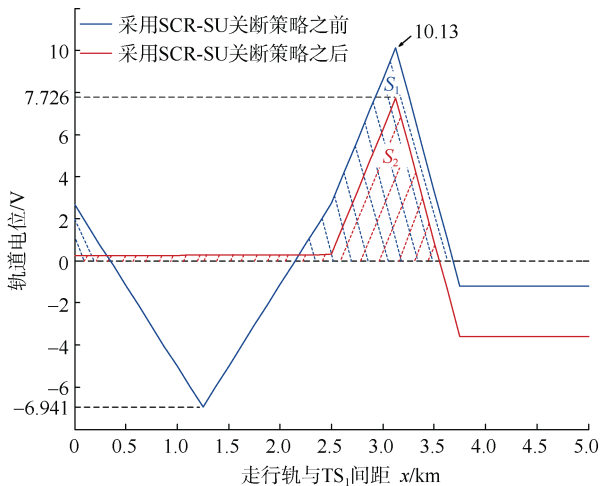


图11 列车位于 $l=3.125$ km时轨道电位

Figure 11 Rail potential when train is at $l=3.125$ km

$$i_{s1} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L |u_{r1}| dx = \frac{S_1}{R_g} \quad (3)$$

$$i_{s2} = \frac{1}{2R_g} \int_0^L |u_{r2}| dx = \frac{S_2}{R_g} \quad (4)$$

式中, i_{s1} 和 i_{s2} 分别为采用SCR-SU关断策略前后的杂散电流总量, u_{r1} 和 u_{r2} 分别为采用SCR-SU关断策略前后的轨道电位分布, S_1 和 S_2 分别为图11中红色和蓝色阴影部分面积, R_g 为轨-地过渡电阻大小。

如图12所示,若ZRCS能够正常工作,即SCR-SU可正常关断,则全路段下,由列车运行所带来的杂散电流平均值由1 035 mA降至314.1 mA,降低了69.7%。但倘若SU-1无法关断,全路段下杂散电流的平均值增加至425.8 mA,增加了35.6%。定义杂散电流抑制率 ζ 如式(5)所示, ZRCS在采用SCR-SU关断策略与不采用SCR-SU关断策略的平均杂散电流抑制率分别为69.7%和58.8%。

$$\zeta = \frac{I_{\text{stray_CON-TPS}} - I_{\text{stray_ZRCS}}}{I_{\text{stray_CON-TPS}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, ζ 为杂散电流抑制率, $I_{\text{stray_CON-TPS}}$ 为CON-TPS下的杂散电流, $I_{\text{stray_ZRCS}}$ 为ZRCS下的杂散电流。

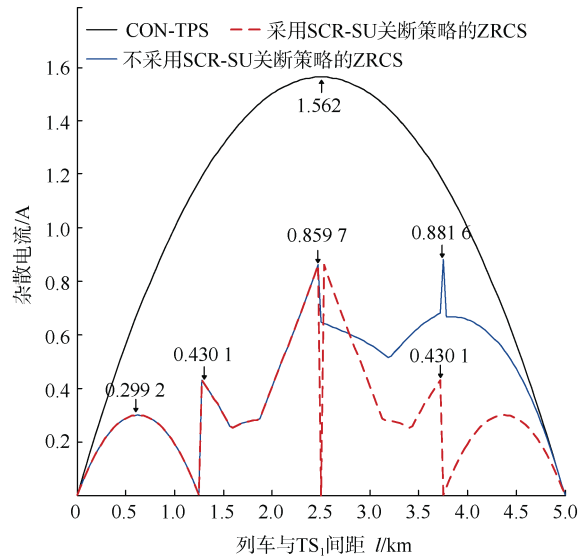


图12 杂散电流

Figure 12 Stray current

仿真结果表明,无法关断的SCR-SU会对ZRCS的正常工作和杂散电流的治理效果造成显著影响。而采用本文所提出的关断策略能够可靠关断SCR-SU,从而保证ZRCS的正常运行。

4.2 实验验证

为验证SCR-SU及其关断策略在ZRCS中的可行

性以及上述理论分析的正确性,搭建了图 13 的实验平台。其中,列车以可编程电流源等效,两个 NRC 分别由两个独立电源供电,3 个 SCR-SU 将供电区间平均分成 4 个区段,其中 CON-TPS 与回流线缆由离散化的电阻网络等效替代,主要参数见表 2。

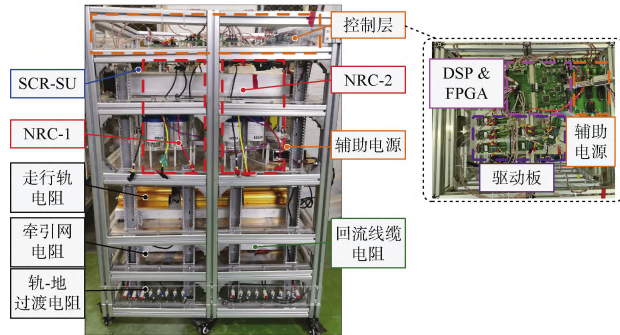


图 13 实验平台示意

Figure 13 Experimental platform

表 2 CON-TPS 与 ZRCS 实验参数

Table 2 Experimental parameters of CON-TPS and ZRCS

参数		数值
CON-TPS	接触网纵向电阻 $R_l/(\Omega/\text{km})$	0.5
	行走轨纵向电阻 $R_r/(\Omega/\text{km})$	2
	轨-地过渡电阻 $R_g/(\Omega/\text{km})$	31.25
	供电距离 L/km	5
	列车牵引电流 i_t/A	16
ZRCS	NRC 输入电压 U_{in}/V	150
	NRC 电感 $L/\mu\text{H}$	330
	NRC 输出电容 $C_o/\mu\text{F}$	1 200
	NRC 开关频率 f_s/kHz	20
	回流线缆纵向电阻 $R_{Rca}/(\Omega/\text{km})$	2
区段数量 n		4

图 14 为当列车位于 3.125 km 处时 SU-1 的关断过程, t_0 时刻开始关断 SU-1, t_1 时刻完成 SU-1 的关断, t_2 时刻恢复 NRC-1 的正常输出。 U_{zeroloop_2} 为 NRC-2 构成的零阻回路电压,即 NRC-2 输出电压与区段 4 的回流线缆压降和 SU-3 的导通压降之和,在 NRC-1 执行 SCR-SU 关断策略前后 U_{zeroloop_2} 的值始终保持为零,可见 SU-3、回流线缆与 NRC-2 的等效电阻之和约等于零,零阻回路有效构建。因此 NRC-1 在执行 SCR-SU 关断策略不会影响 NRC-2 零阻回路正常构建,即 ZRCS 剩余部分可正常工作。

SU-1 的关断耗时约为 57 ms,其关断速度主要与负阻变换器的动态响应速度有关。 $I_{\text{SU-1}}$ 为流过 SU-1

的电流,关断前为 6.6 A,当 NRC-1 输出电压降至零后 SU-1 可靠关断,电流降至 0 A 后保持不变。在执行 SCR-SU 关断策略前后,NRC-1 输出电压分别为 31.5 V 和 32 V,略有增加,其变化趋势符合仿真结果。

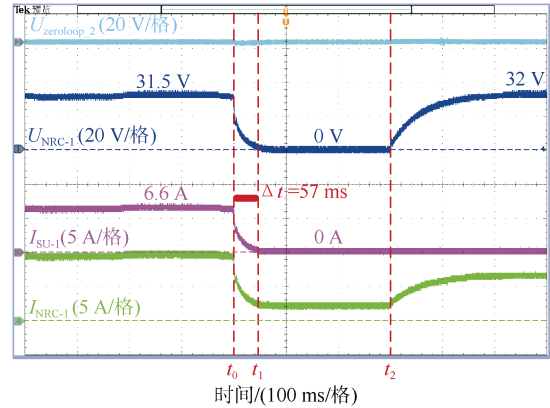


图 14 NRC-1 关断 SU-1 实验结果

Figure 14 Experimental result of SU-1 turning off by NRC-1

$I_{\text{NRC-1}}$ 为流过 NRC-1 的电流,执行 SCR-SU 关断策略前后分别为 9.9 A 和 6.3 A,根据式(6)可知在 SU-1 可靠换流关断后, NRC-1 的等效电阻为 -5.08Ω 。区段 1、2 回流线缆电阻之和为 5Ω ,此时 SCR-SU 的通态压降为 0.855 V, SU-2 流过电流为 7.4 A,其等效电阻约为 0.11Ω ,则此时 SU-2、回流线缆与 NRC-1 等效电阻之和为 0.03Ω ,约等于零。这说明此时 NRC-1 恢复正常工作,成功构建了零阻回路供列车的牵引电流回流至 TS₁。

$$R_{\text{NRC_eq}} = -\frac{U_{\text{NRC}}}{I_{\text{NRC}}} \quad (6)$$

式中, $R_{\text{NRC_eq}}$ 为 NRC 输出等效电阻, U_{NRC} 为 NRC 输出电压, I_{NRC} 为 NRC 输出电流。

图 15 为 SU-1 关断前后的轨道电位分布,分别采集 TS₁、SU-1、SU-2、列车、SU-3 与 TS₂ 处轨道电位来拟合全路段下的轨道电位分布情况。根据式(3)和(4)可计算 SU-1 关断前后,即采用 SCR-SU 关断策略前后,轨道电位的最大值分别为 10.41 V 和 8.587 V,杂散电流总量分别为 0.485 7 A 和 0.359 8 A,而此时 CON-TPS 的轨道电位最大值和杂散电流总量分别为 17.78 V 和 1.465 A,根据式(5)可得,采用 SCR-SU 关断策略前后的杂散电流抑制率分别为 66.84%和 75.44%。

图 16 为基于 SCR-SU 的 ZRCS 的实验结果,其中 CON-TPS 的全路段下平均杂散电流为 986.4 mA,而基于 SCR-SU 的 ZRCS 平均杂散电流仅为 210.9 mA,

平均抑制率可达到 78.62%。因此采用了 SCR-SU 的 ZRCS 对杂散电流的治理效果得以验证。

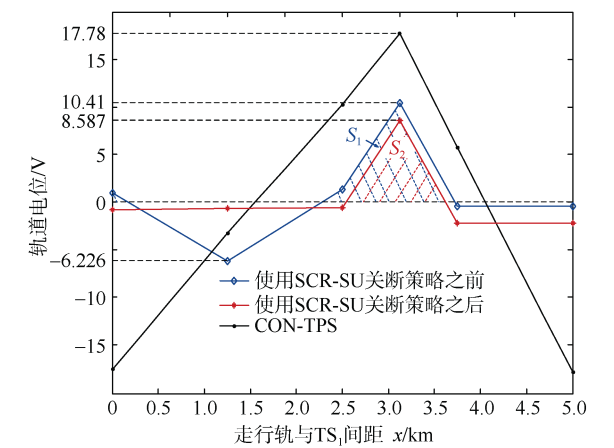


图 15 列车位于 $l=3.125$ km 时轨道电位分布实验结果
Figure 15 Experiment result of rail potential distribution when train is at $l=3.125$ km

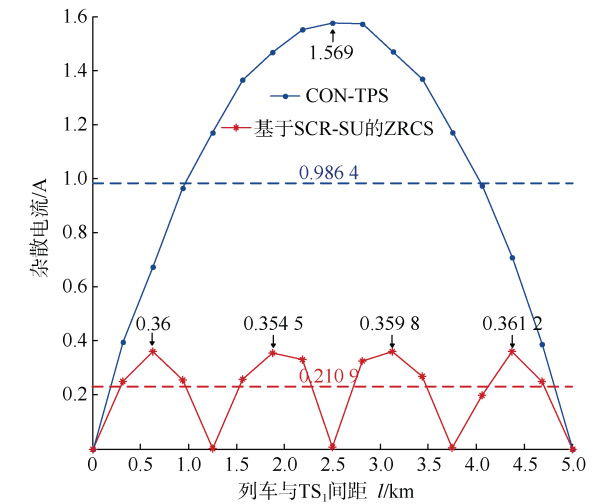


图 16 CON-TPS 与基于 SCR-SU 的 ZRCS 实验结果
Figure 16 Experimental results of CON-TPS and SCR-SU based ZRCS

表 3 为容量相近的 IGBT 模块 FF150R12RT4 与晶闸管模块 MTC160A 构成的开关单元的对比。在流过相同电流的情况下,IGBT-SU 的损耗为 SCR-SU 的 2.5 倍,且成本提升了 3.2 倍。在面对开关单元突然导通时的浪涌电流时,SCR-SU 可承受 5 400 A 的浪涌电流,为其额定电流的 33 倍;而 IGBT-SU 面对浪涌电流的可靠性较差。

在搭建的硬件实验平台中,当列车位于 3.125 km 处时,此时 SU-2 流过 7.4 A 的电流,IGBT-SU 与 SCR-SU 的导通压降分别为 1.871 V 与 0.855 V,此时

SCR-SU 在流过相同电流下损耗仅为 IGBT-SU 的 45.7%。综上,SCR-SU 相比于 IGBT-SU 具有成本、损耗与可靠性上的显著优势。

表 3 IGBT-SU 与 SCR-SU 对比
Table 3 Comparison between IGBT-SU and SCR-SU

	IGBT-SU	SCR-SU
额定电压/V	1 200	1 600
额定电流/A	150	160
最大导通压降/V	3.50	1.40
浪涌电流/A	—	5 400
价格/元	240	75

5 结论

本文对 SCR-SU 在 ZRCS 中的关断策略展开研究,在揭示 SCR-SU 关断机理基础上,从 ZRCS 系统级层面提出了基于负阻变换器的 SCR-SU 关断策略。对上述内容展开了详细的理论研究、仿真与实验验证,得到下述结论:

- 1) SCR-SU 和 IGBT-SU 相比,不仅在成本方面有着显著优势,且在损耗与可靠性方面具有明显优势,更具推广前景。
- 2) 基于负阻变换器的 SCR-SU 关断策略能够在不影响 ZRCS 正常工作的条件下实现 SCR-SU 的可靠关断,从而保证 ZRCS 的正常运行。
- 3) 基于 SCR-SU 的 ZRCS 在正常工作的情况下可有效治理城市轨道交通中的杂散电流问题,具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 侯秀芳,梅建萍,左超. 2021 年中国内地城轨交通线路概况[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 12-16.
HOU Xiufang, MEI Jianping, ZUO Chao. Overview of urban rail transit lines in Chinese mainland in 2021[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 12-16.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.
- [5] 杨晓峰, 薛皓, 郑琼林. 基于双向可变电阻模块的杂散电流与轨道电位动态模拟系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2793-2805.
- YANG Xiaofeng, XUE Hao, ZHENG Trillion Q. Stray current and rail potential dynamic simulation system based on bidirectional variable resistance module[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(13): 2793-2805.
- [6] 王慧康, 杨晓峰, 倪梦涵, 等. 轨道电位与杂散电流动态模拟实验平台[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] LEE C H, LU C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. IEEE transactions on power delivery, 2006, 21(4): 1941-1947.
- [8] DOLARA A, FOIADELLI F, LEVA S. Stray Current effects mitigation in subway tunnels[J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(4): 2304-2311.
- [9] CHEN Z, KOLEVA D, VAN B K. A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure[J]. Corrosion reviews, 2017, 35(6): 397-423.
- [10] NIASATI M, GHOLAMI A. Overview of stray current control in DC railway systems[C]//IET international conference on railway engineering, Hong Kong, 2008: 1-6.
- [11] 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.
- [12] 李威. 地铁杂散电流的监测与防治[J]. 城市轨道交通研究, 2003(4): 48-52.
- LI Wei. The monitor and control system of stray current corrosion in metro[J]. Urban mass transit, 2003(4): 48-52.
- [13] FOTOUHI R, FARSHAD S, FAZEL S S. A new novel DC booster circuit to reduce stray current and rail potential in DC railways[C]//IEEE compatibility and power electronics, Badajoz, Spain, 2009: 457-462.
- [14] 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, Poland, 2008: 1575-1580.
- [15] WANG M, YANG X, ZHENG T Q, et al. 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.
- [16] 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.
- [17] SHANG Z, YANG X, GU J et al. Modeling of negative resistance converter traction power system[C]// Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Virtual IEEE, 2020: 6367-6371.
- [18] YANG X, GU J, ZHENG T Q, et al. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system[J]. Microelectronics reliability, 2020, 114: 113911.
- [19] 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(08): 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.
- [20] 杨晓峰, 郑琼林, 顾靖达. 地铁列车位置检测系统: 中国, CN202010122181[P]. 2020.
- [21] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMANN U, et al. Semiconductor Power Devices[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [22] 田国雄. 一种强制关断晶闸管的辅助关断电路: 中国, CN203504513U[P]. 2013.

(编辑: 王艳菊)