

文章编号: 1674—8247(2024)02—0065—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.02.012

# 牵引供电技术研究现状及关键性技术

孙 亮<sup>1</sup> 吕 伟<sup>2</sup> 彭 旭<sup>2</sup> 文 学<sup>2</sup>

(1. 包钢集团电气有限公司, 内蒙古 包头 014000; 2. 中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

**摘 要:**我国电气化铁路里程稳居世界第一。牵引供电系统作为电气化铁路的能量心脏,其整体性能的优劣直接影响铁路的安全、稳定、经济运营。我国现有牵引供电系统面临着严重的电能质量问题,以及大量电分相制约列车速度等问题。为此,本文针对既有的分相供电系统与发展中的同相供电系统,分别从工作原理、发展现状、面临问题、关键技术等方面进行系统地梳理归纳。通过分析现有研究的成果以及不足之处,总结出构建新一代牵引供电系统仍需完善的关键性技术与未来研究趋势。希望为相关领域学者进行更深入的研究提供借鉴与参考。

**关键词:**电气化铁路;牵引供电系统;分相供电;同相供电;研究趋势

**中图分类号:** U223

**文献标志码:** A

## Research Status and Key Technologies of Traction Power Supply Technology

SUN Liang<sup>1</sup> LV Wei<sup>2</sup> PENG Xu<sup>2</sup> WEN Xue<sup>2</sup>

(1. Baotou Steel Group Electric Co., Ltd., Baotou 014000, China;

2. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** China boasts the world's longest electrified railway network. The traction power supply system, which serves as the vital energy hub for these railways, plays a crucial role in ensuring their safety, stability, and cost-effective performance. The current traction power supply system in China is contending with significant power quality challenges, coupled with issues like restricted train speeds owing to the prevalent adoption of electrical phase splitting technology. In response to the evolving needs of traction power supply systems, this paper comprehensively reviewed the operational principles, current progress, challenges, and critical technologies of the established split-phase power supply system as well as the emerging in-phase supply system, analyzed the accomplishments and limitations of extant research, concluded the pinpointing crucial technologies that require refinement for the construction of a new generation of traction power supply systems. Additionally, the paper charted potential directions for future studies, to offer a valuable framework for academics in corresponding fields to pursue further comprehensive research.

**Key words:** electrified railway; traction power supply system; split-phase power supply; in-phase power supply; research trends

我国电气化铁路经历了高速发展,运营里程已位居世界第一。截至 2023 年底,总里程超过 11.4 万 km,其中高速铁路里程超过 4.2 万 km。牵引供电系统作

为电气化铁路的核心部分,主要承担着为整个系统供电的职责。因此,牵引供电系统一直是电气化铁路领域的研究热点<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2022-08-09

作者简介:孙亮(1996-),男,助理工程师。

引文格式:孙亮,吕伟,彭旭,等.牵引供电技术研究现状及关键性技术[J].高速铁路技术,2024,15(2):65-70.

SUN Liang, LV Wei, PENG Xu, et al. Research Status and Key Technologies of Traction Power Supply Technology [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2):65-70.

目前,我国牵引供电系统在电能质量方面仍面临严重的负序、谐波问题,以及系统结构造成的过分相(分区供电)问题。近年来我国学者开展了大量相关研究,在同相供电、牵引变压器研究领域取得了丰硕成果。然而,鲜有学者对牵引供电系统层面的研究现状与最新进展进行系统地梳理和归纳。

有鉴于此,本文针对既有的分相供电系统与发展中的同相供电系统,分别从工作原理、发展现状、面临的问题、关键技术等多个方面进行系统地梳理归纳,分析现有研究取得的成果以及不足之处,总结出构建新一代牵引供电系统仍需完善的关键性技术与未来研究趋势,旨在为相关研究提供参考。

1 分相供电

路段上所有的牵引变电所及与其相连的牵引网共同构成该路段的牵引供电系统。目前我国电气化铁路主要采用三相-两相结构的分相牵引供电系统,如图1所示。牵引变电所负责将公共电网电能变换为负载可利用电能,并通过供电臂输送于两侧牵引网。由于牵引变压器输出电压不可控,不同供电臂无法并网工作,整个系统需要设置大量电分相。

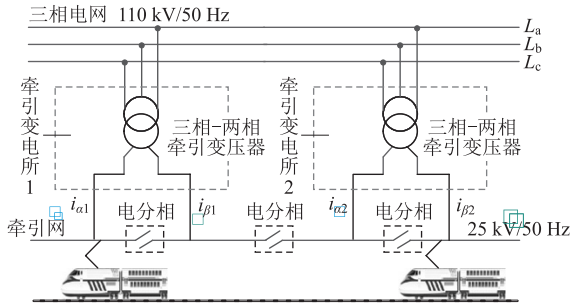


图1 分相牵引供电系统图

鉴于我国电气化铁路供电制式的特殊性,导致形成单相负荷对应三相电源的情况,因此,降低系统三相不平衡度、治理负序电流是我国牵引供电系统亟需解决的问题。同时,我国还面临多种电力机车(不控整流型、交-直-交型)共存的情况,导致牵引供电系统存在无功和谐波问题。

1.1 相序轮换供电

我国电气化铁路在治理负序问题时,多采用相序轮换的供电技术,来降低系统三相不平衡度。相序轮换供电结构如图2所示。

相序轮换供电技术通过将变压器一次侧端子按设定规律循环接入电力系统的不同相,以达到类似三相对称负载的效果。图2中 $S_1 \sim S_6$ 为牵引变电所,

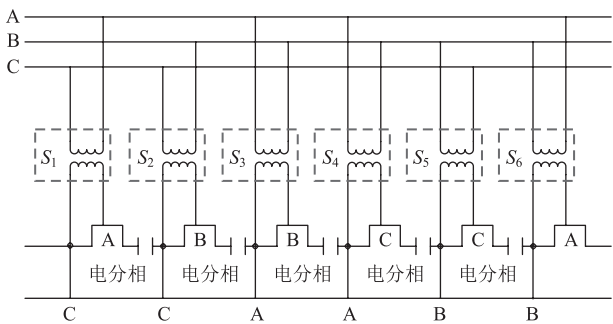


图2 应用相序轮换的牵引变电所联结结构图

6个牵引变电所进行依接换相序。 $S_1$ 和 $S_4$ 接入A、C相, $S_2$ 和 $S_5$ 接入B、C相, $S_3$ 和 $S_6$ 接入B、A相,但接入相序均相反,每6个牵引变电所为1个循环单位<sup>[2]</sup>。

牵引供电系统内变电所在供电时按组合进行完整的相序轮换,并对各供电区间车辆合理运行安排,可以大幅减少牵引供电系统向三相系统注入的负序电流。但是在铁路的实际运输过程中,各区段车辆的运行协调难度较大。因此各段负荷不同导致输出电流和功率因数不同,甚至某区段会出现仅单臂供电,所以相序轮换的供电方式不能从根本上解决牵引供电的负序问题,只能起到缓解作用。同时,相序轮换导致各个供电臂之间输出电压不同,因此系统需要设置大量的电分相分区供电。机车过电分相环节要经历退网、断电等过程,会对列车速度和运载能力造成较多的限制,并且电分相是系统的脆弱环节,易发生故障影响系统正常运行。国内外诸多学者针对电分相进行了大量研究,取得了丰硕的成果,同相供电、双边供电等技术等均可有效解决牵引供电系统过分相问题,但是这类技术仍需完善才能在我国电气化铁路工程中普遍应用。

1.2 无功、谐波与负序治理

由于我国大多数电气化铁路仍在使用三相-两相牵引变压器,因此普遍面临严重的电能质量问题(无功、谐波与负序)。经过多年的研究,相关学者提出了多种改善牵引供电系统电能质量的补偿装置,应用及研究最广泛的有静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)、铁路功率调节器(Railway Power Regulator, RPC)、有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)。

带静止无功补偿器(SVC)的牵引变电所结构如图3所示,通过调节SVC电路上半控型器件的导通角可实现对电抗器 $L$ 电流的控制,进而改变 $L$ 产生的无功,并供应给负载。SVC结构简单、造价低廉,并且可以消除一定的谐波,但是无法对负序电流进行补偿<sup>[3]</sup>。

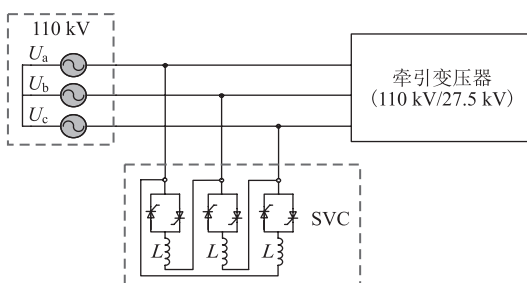


图3 带静止无功补偿器牵引变电所结构图

带RPC补偿装置的牵引供电系统结构如图4所示, RPC两端通过降压变压器分别连接牵引变电所左右供电臂,内部变换器通过直流环节相连。 $i_{\alpha L}$ 、 $i_{\beta L}$ 为负荷电流,  $i_{\alpha c}$ 、 $i_{\beta c}$ 为RPC补偿电流。

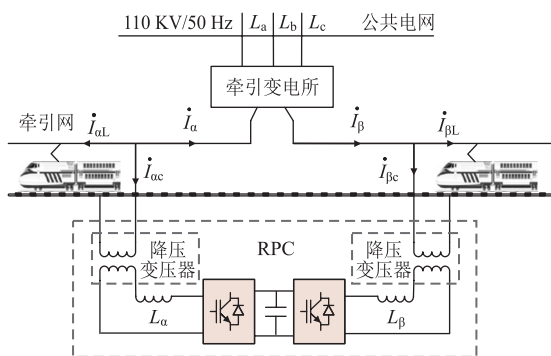


图4 基于RPC的牵引供电系统结构图

RPC工作原理为:先通过转移功率使得 $i_{\alpha L}$ 、 $i_{\beta L}$ 幅值相等,然后检测 $\alpha$ 臂和 $\beta$ 臂所需容性或感性无功电流,输出 $i_{\alpha c}$ 和 $i_{\beta c}$ 为其补偿,最后达到平衡,实现无功和负序的补偿。补偿相量关系如图5所示。

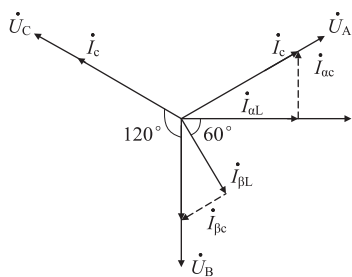


图5 无功和负序补偿相量图

有源电力滤波器(APF),工业应用以并联型为主。带并联型APF补偿装置的牵引供电系统结构如图6所示。APF和机车负载并联,可对牵引变电所输出电流进行调节。APF内部包含多个功能电路,运算电路通过控制算法对负载电流谐波分量进行提取,控制电路通过APF控制算法对运算电路提取结果进行

跟踪,并产生PWM信号对主电路进行驱动使其输出对应补偿电流。

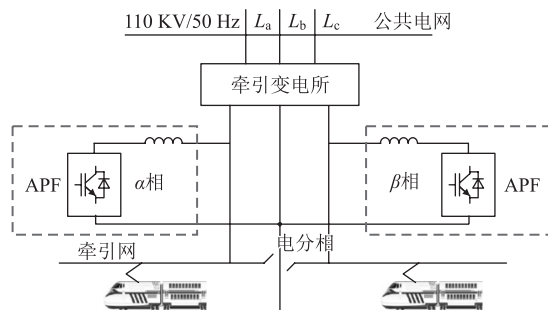


图6 APF并联于牵引网示意图

随着电力电子技术的发展,一些综合治理的方案不断被提出,可以同时补偿牵引变电所网侧负序、谐波和无功。文献[4]提出基于正、负序双闭环控制与预测电流控制相结合的复合控制策略,应用于由三相三电平补偿器通过多绕组变压器并联构成的综合补偿器,实现对牵引变电所网侧负序、无功和谐波的实时补偿。文献[5]提出一种基于单相dq理论的控制策略,使补偿器可以同时补偿无功和不平衡电流。文献[6]通过将两相三线制变流器与晶闸管投切无源器件组合,采取负序、谐波电流的无差拍主动补偿策略实现牵引供电系统的综合治理。文献[7]提出一种可降低成本由PRC和SVC构成的混合型电能质量控制系统,并提出一种补偿容量优化的方案。文献[8]研究了基于超级电容的RPC,提出一种分为能量管理和变流器控制层面的分层控制策略。文献[9]结合载波相移梯形脉宽调制策略,提出了一种可有效抑制系统谐波电流并提高直流电压稳定性的级联APF直流电压内外层评估策略。文献[10]针对静止功率调节器,结合准比例谐振控制研究了一种改进型滞环控制策略,用于提高控制响应速度与稳态性能。

## 2 同相供电

文献[11]首次提出同相供电概念,指各牵引供电所供电区段内牵引网提供电压一致,无需设置电分环节。铁路全线统一使用单相变压器,并且都以相同的方式接入公共三相系统。同相供电是实现牵引供电系统同相化最简单的方式,但是这种方式将给三相系统造成极严重的负序问题,因此在构建同相牵引供电系统的同时应当考虑负序治理,构建与单相三相对称变换相结合,可以说,单相三相对称变换是实现同相供电的关键<sup>[12]</sup>。下面从两种不同的单相三相对称变换技术角度阐述同相牵引供电系统的构建。



## 2.1 基于对称补偿的同相供电

通过相应补偿装置对牵引变压器进行对称补偿,实现两供电臂输出相同电压构建同相供电系统,根据补偿设备的性质进行分类,可分为:

(1) 基于无源元件的对称补偿,电抗器、电容器。

(2) 基于有源元件的对称补偿,静止无功发生器(SVG)、背靠背四象限变流器(RPC)等。

### 2.1.1 无源对称补偿

V/v型和YNd11型是我国电气化铁路牵引变电所普遍使用的变压器接线方式。以V/v变压器和YNd11变压器为例,由无源器件构成的对称补偿系统如图7所示。由于2个变压器均为120°接线,补偿设置相同。以V/v变压器为例, $S_1$ 为机车负载容量, $S_2$ 、 $S_3$ 和 $S_4$ 分别为AC相、BC相和AB相的无源器件补偿容量。由于机车和牵引网一般都是感性负荷,因此 $S_2$ 、 $S_3$ 一般设置为电容器, $S_4$ 设置为电抗器。

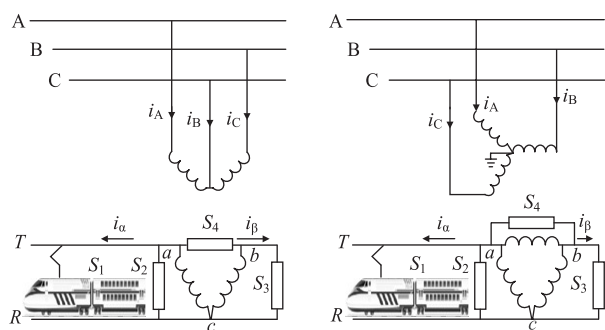


图7 无源对称补偿同相供电系统图

令负载机车 $S_1$ 的功率因数角为 $\varphi$ ,负载两端与牵引变压器副边AC相、BC相和AB相电压相位角分别为 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 、 $\varphi_4$ ,以图7为例, $\varphi_1 = \varphi_2$ , $\varphi_3 = \varphi_1 + 120^\circ$ , $\varphi_4 = \varphi_1 - 120^\circ$ 。根据无源对称补偿理论<sup>[13]</sup>,可得各相补偿量:

$$\begin{bmatrix} S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (K_C + 2K_N) \sin \varphi \\ K_C \sin \varphi + 2K_N \cos(\varphi + 30^\circ) \\ K_C \sin \varphi + 2K_N \cos(\varphi + 150^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.1.2 有源对称补偿

构建同相供电系统主要应用的有源对称补偿装置为SVG(Static Var Genertor)和RPC两种。以V/v变压器为例,带SVG对称补偿的同相供电系统如图8所示。SVG作为有源器件,可以根据控制信号发出容性或感性无功,具有良好动态补偿能力。对于具有再生制动的列车负荷,在再生制动时,由于是电能回流向电力系统,所以牵引变压器补偿状态需要相反,以SVG作为补偿装置可随时调整补偿状态,能满足多种

工况。有学者提出一种在中心牵引变电所安装大功率SVG的集中补偿同相供电方案,适用于高原长坡道铁路的贯通供电。文献[14]提出一种引入负序和无功约束因子的SVG综合补偿方案,同时适用于单所和长距离贯通供电。

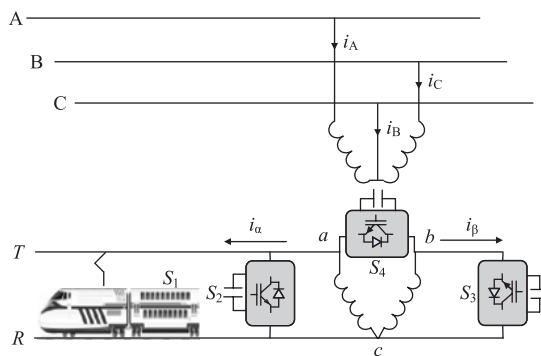


图8 基于V/v变压器SVG补偿同相供电系统图

铁路功率调节器(RPC)1993年被提出,并于2002年在工程上成功应用<sup>[15-16]</sup>。该装置工作原理已在1.2节阐述,安装了RPC的日本新干线牵引供电系统已成功运行多年,证实了这套补偿系统的优越性。文献[17]提出了一种同相供电结构,由V型变压器和H桥的模块化多电平PRC组成,并提出一种改进型电流检测方法及其空着策略。有学者结合三相补平衡度、电压电流波形畸变等指标提出一种适用于高速铁路的同相供电系统运行能量多维控制方法,提高了三相电流平衡度和均压稳定效果。文献[18]研究了电网不平衡状态下的负序补偿算法,提出了变压器副边的正负序电压分离方法以及RPC的负序电流完全补偿策略,并进行了多角度仿真验证。

## 2.2 基于电力电子变换器的同相供电

电力电子变换器可实现电能的三相单相对称变换及传输,能构建同相供电系统,此系统牵引变电所通常采用交-直-交变换器取代牵引变压器作为连接三相电网与牵引网的枢纽。文献[19-20]首次设计了由三相-单相变换器构建的贯通式同相供电系统,系统及变换器结构如图9所示。该系统只需控制各牵引变电所逆变器输出电压一致,即可实现贯通供电,并且这类系统方便光伏等新能源接入。但是,该系统由于输出端存在升压变压器与滤波器等装置,增加了输出电压控制的难度,以及牵引变电所之间距离遥远通信困难,导致所间协同并网难度大。

文献[21]为了提高输出电压的控制精度,构建了一种变换器级联的贯通式供电系统,在逆变侧采用级联结构提高输出电压等级,可省去升压变压器。文献[22]

提出一种基于两相-单相级联变换器的贯通供电改造方案,适用于现有牵引变电所的改造,并提出了级联模块故障后的功率均衡策略。文献[23]研究了一种基于单相交-直-交级联变换器的贯通式牵引供电系统,深入分析了变换器直流环节二次纹波的产生机理,提出了整流侧及逆变侧的全次数和特征次谐波抑制策略。

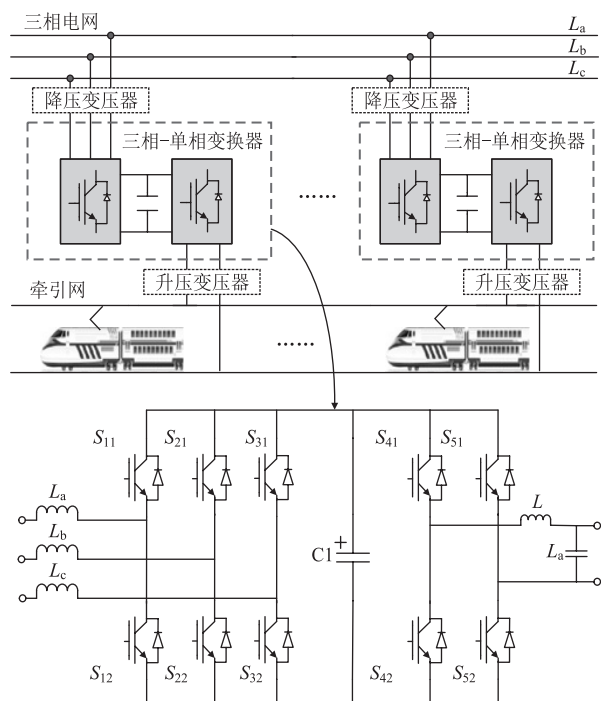


图9 基于三相-单相变换器的贯通式供电系统图

### 3 结束语

“双碳”目标的提出以及电气化铁路行车密度和速度的逐年提升对牵引供电系统的供电能力提出了更高的要求。电能质量问题、彻底取消电分相、新能源与制动再生能量的高效利用等成为当前的研究热点。本文对于当前牵引供电研究情况做以下总结：

(1) 同相供电是必然趋势,基于对称补偿的同相供电难以取消变电所间电分相,双边供电与牵引变电所群集中补偿方案可以解决上述问题。但是双边供电面临均衡电流、电能计费等问题,集中补偿方案面临控制难度高、补偿装置造价昂贵等问题。后续学者们可从补偿结构、控制策略等方面开展相关研究。

(2) 基于电力电子变换器的贯通式供电系统是更为理想的供电方式,可彻底取消电分相、方便新能源接入、利于再生能量回流。但是电力电子器件容量相对较小,需要进行模块的级联或并联,增加了控制难度和一次建设成本。同时,大量开关器件的使用导致

系统可靠性的降低。研究节省器件的新型电路拓扑、容错评估策略等可作为上述问题的解决思路。

### 参考文献:

- [1] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 119-124.  
LI Qunzhan. On some Technical Key Problems in the Development of Traction Power Supply System for High-speed Railway in China [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 119-124.
- [2] 吴世文. 相序轮换在高铁牵引供电系统中的应用分析[J]. 海峡科学, 2017(3): 3-7.  
WU Shiwen. Application of Phase Sequence Rotation in High-speed Rail Traction Power Supply System [J]. Straits Science, 2017(3): 3-7.
- [3] 王卫安, 桂卫华, 张定华, 等. 基于大容量 SVC 的 SCOTT 变压器电能质量治理方案及应用[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 31-38.  
WANG Weian, GUI Weihua, ZHANG Dinghua, et al. SCOTT Transformer Power Quality Compensation Scheme and Its Application Based on High-capacity SVC [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 31-38.
- [4] 何晓琼, 彭俊, 韩鹏程, 等. 电气化铁路综合补偿器控制策略研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(9): 74-84.  
HE Xiaojiong, PENG Jun, HAN Pengcheng, et al. Study on Control Strategy of Comprehensive Compensator for Electrified Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(9): 74-84.
- [5] SINGH B, MURTHY S S, CHILIP R S R. STATCOM-based Controller for a Three-phase SEIG Feeding Single-phase Loads [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 320-331.
- [6] 张珊, 陈剑云, 邓才波. 高速铁路负序和谐波问题治理方案研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 43-48.  
ZHANG Shan, CHEN Jianyun, DENG Caibo. Research on Treatment Scheme of Negative Sequence and Harmonic Problems in High-speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 43-48.
- [7] 马茜, 谭磊, 罗培. V/v 牵引供电所混合型电能质量控制系统负序优化补偿策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 128-132.  
MA Qian, TAN Lei, LUO Pei. Optimal Negative-sequence Compensation of Hybrid Power-quality Management System for V/v Traction Substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 128-132.
- [8] CUI Guiping, LUO Longfu, LIANG Chonggan, et al. Supercapacitor Integrated Railway Static Power Conditioner for Regenerative Braking Energy Recycling and Power Quality Improvement of High-speed Railway System [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(3): 702-714.
- [9] 李红, 周天奇, 杨剑锋. 单相级联 H 桥 APF 载波相移梯形波脉宽调制与电容电压平衡控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报,

- 2019, 31(11): 10–15.
- LI Hong, ZHOU Tianqi, YANG Jianfeng. Carrier Phase-shifted Trapezoidal Wave PWM and Capacitor Voltage Balanced Control for Single-phase Cascaded H-bridge APF [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 10–15.
- [10] 谭丽平, 栗渊恺, 欧阳盟盟, 等. 静止功率调节器电能质量综合补偿的改进滞环控制方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 91–96.
- TAN Liping, SU Yuankai, OUYANG Mengmeng, et al. Study on Improved Hysteresis Control Method of Static Power Conditioner for Comprehensive Compensation of Power Quality [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 91–96.
- [11] 李群湛, 张进思, 贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报, 1988, 10(4): 23–31.
- LI Qunzhan, ZHANG Jinsi, HE Weijun. Study of a New Power Supply System for Heavy Haul Electric Traction [J]. Journal of the China Railway Society, 1988, 10(4): 23–31.
- [12] 周福林. 同相供电系统结构与控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- ZHOU Fulin. Research on Cophased Traction Power System's Scheme and Control Strategy [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [13] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- LI Qunzhan. Power Supply Analysis and Comprehensive Compensation Technology of Traction Substation [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [14] 张宇, 王辉, 李群湛, 等. 基于 Dd 匹配变和 SVG 的牵引变电所群贯通供电系统负序治理方案及控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 150–158.
- ZHANG Yu, WANG Hui, LI Qunzhan, et al. Negative Sequence Treatment and Control Strategy for the Co-phase Interconnected Power Supply System of Traction Substation Group Based on Dd Transformer and SVG [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 150–158.
- [15] MORIMOTO H, ANDO M, MOCHINAGA Y, et al. Development of Railway Static Power Conditioner Used at Substation for Shinkansen [C] //Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No. 02TH8579). April 2–5, 2002, Osaka, Japan. IEEE, Aug. 2002: 1108–1111.
- [16] UZUKA T, IKEDO S. Railway Static Power Conditioner Field Test [J]. Quarterly Report of RTRI, 2004, 45(2): 64–67.
- [17] 陈莉, 杨飏, 陈剑. 基于单相 H 桥型 MMC 高速铁路新型同相供电系统[J]. 电气化铁道, 2022, 33(3): 38–42.
- CHEN Li, YANG Yang, CHEN Jian. Novel In-phase Power Supply System for High-speed Railway Based on Single-phase H-bridge MMC [J]. Electric Railway, 2022, 33(3): 38–42.
- [18] 张建辉, 许莹莹, 李云丰. 交流电网不平衡下铁路功率调节器负序电流完全补偿策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3144–3154.
- ZHANG Jianhui, XU Yingying, LI Yunfeng. Completed Compensation Strategy Research of Railway Power Conditioner for Negative-sequence Current under Unbalanced AC Power Grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3144–3154.
- [19] 何晓琼. 基于多电平三相-单相变换器的贯通式同相牵引供电系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- HE Xiaojiong. The Advanced Co-phase Traction Power Supply System Based on Multilevel Three-phase to Single-phase Converter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [20] HE Xiaojiong, SHU Zeliang, PENG Xu, et al. Advanced Cophase Traction Power Supply System Based on Three-phase to Single-phase Converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5323–5333.
- [21] HE Xiaojiong, GUO Aiping, PENG Xu, et al. A Traction Three-phase to Single-phase Cascade Converter Substation in an Advanced Traction Power Supply System [J]. Energies, 2015, 8(9): 9915–9929.
- [22] 孟令辉, 周犹松, 闫晗, 等. 应用于贯通供电系统的两相-单相变换器直流电压纹波特性与功率均衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6449–6460.
- MENG Linghui, ZHOU Yousong, YAN Han, et al. DC-link Voltage Ripple Analysis and Power Balanced Control for Two-phase to Single-phase Converter in Advanced Traction Power Supply System [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6449–6460.
- [23] 彭俊. 基于贯通式牵引供电系统的单相交-直-交变换器研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- PENG Jun. Research on Single Intersection-DC-AC Converter Based on through Traction Power Supply System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.