

文章编号: 1000-128X(2019)03-0001-05

电气化铁路列车过分相技术现状及发展

胡家喜, 周方圆

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 介绍电气化铁路牵引供电系统结构以及电分相区的存在给牵引供电系统带来的影响; 阐述车载自动过分相和3种地面自动过分相的发展现状及存在问题, 对各种方案的优缺点进行对比分析, 指出各方案值得借鉴之处; 提出一种虚拟同相柔性供电系统方案, 该方案同时解决电分相和电能质量的问题, 为电气化铁路的发展提供了新思路。

关键词: 自动过分相; 机械开关; 电子开关; 变频移相; 虚拟同相柔性供电系统; 电气化铁路

中图分类号: U264.91; U223.5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.03.001

Status and Development of Neutral Section Passing Technology for Electrified Railway Trains

HU Jiayi, ZHOU Fangyuan

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Structure of the electrified railway traction power supply system and the influence of the existence of the electrical phase separation zone on the traction power supply system were introduced. By discussing the development status and existing problems of automatic neutral section passing technology and three kinds of ground automatic neutral section passing technologies all over the world, a comparative analysis of the advantages and disadvantages of various programs was put forward, and the merits of each scheme was pointed out. A virtual in-phase flexible power supply system scheme was proposed, which solved the problems of neutral section passing and power quality at the same time, providing a new idea for the development of electrified railway.

Keywords: automatic neutral section passing; mechanical switch; electronic switch; variable frequency phase-shift; virtual in-phase flexible power supply system; electrified railway

0 引言

目前, 国内外的电气化铁路牵引供电制式主要有直流供电, 单相交流低频供电和单相交流工频供电3种。如德国、瑞士、瑞典等欧洲国家主要采用15 kV/16.7 Hz单相低频交流供电方式, 意大利、比利时、西班牙等国家主要采用3 kV直流供电方式, 法国、日本、中国等国家主要采用25 kV的单相工频交流供电方式^[1]。经过60年的努力, 中国电气化铁路成功走出了一条从无到有、从低吨位到重载、从普速到高速的探索创新之路。截至2017年底, 中国电气化铁路里程达8.7万

km, 铁路电气化率达68.2%, 位居世界第一, 在技术水平和建设质量上达到世界领先水平^[2]。

交流牵引供电系统是将三相电网电压经牵引变压器降压后为牵引网供电。由于牵引负荷为单相负载, 而电网为三相对称系统, 负载不平衡会在三相系统中产生负序电流。为使电力系统三相尽可能平衡, 接触网采用分段换相供电, 接触网每隔几十公里会设置一个电分相区。电分相的存在会造成列车速度和牵引力的损失, 给电气化铁路带来不利影响^[3]。本文基于国内外自动过分相的发展现状, 总结自动过分相技术的理论研究和工程应用方案, 对比分析其优缺点。

1 列车过分相形式

由于相邻供电区间两接触网电压、相位不同, 为

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1200800)

防止两相短路, 必须在牵引变电所和分区所处设置电分相^[4]。接触网电分相实现方式分为器件式电分相和锚段关节式电分相。器件式电分相由 3 组分相绝缘器组成, 当列车高速通过时, 连续 3 次冲击分相绝缘器, 造成受电弓剧烈振动, 易损坏受电弓, 造成弓网事故; 同时, 分相绝缘器自重大, 会造成分相绝缘器正弛度, 当列车通过时会对其造成冲击, 极易发生断线事故^[5]。锚段关节式电分相克服了器件式电分相的硬点问题, 具有无硬点、过渡平滑、对受电弓和接触网冲击小等优势, 在高速铁路中得到广泛应用^[6]。我国电气化铁路常见的锚段关节式电分相形式主要有六跨、七跨、八跨、九跨、十跨、十二跨等, 160 km/h 速度以上的高速线路中, 主要采用七跨锚段关节式电分相^[7]。

按主断路器闭合与否, 列车过分相方式分为断电过分相和带电过分相。断电过分相又分为手动断电过分相和车载自动过分相; 带电过分相分为柱上开关过分相、机械开关地面自动过分相、电子开关地面自动过分相和柔性地面自动过分相^[8]。手动操作过分相是最传统的列车过分相方式, 具有列车速度损失大、易造成驾驶员疲劳和产生过电压冲击的缺点。柱上开关自动过分相是将自动转换过分相的设备设置在支柱上, 在过分相的瞬间, 对列车实行断电, 虽然其具有方案简单、无需设立分区所、投资少、无需驾驶员操作、列车上的主断路器无需分断等优点, 但存在列车速度损失大、过电压冲击等一系列问题^[9]。

2 车载自动过分相技术

车载自动过分相是为了缓解驾驶员疲劳程度和防止人为操作导致带电闯过分相而发展起来的一种过分相方式^[10]。国内车载自动过分相装置由广州铁路(集团)公司于 2004 年率先在全路大面积使用^[11]。车载断电自动过分相装置主要由地面感应装置以及车载感应接收装置、主电路设备和控制设备构成, 如图 1 所示。

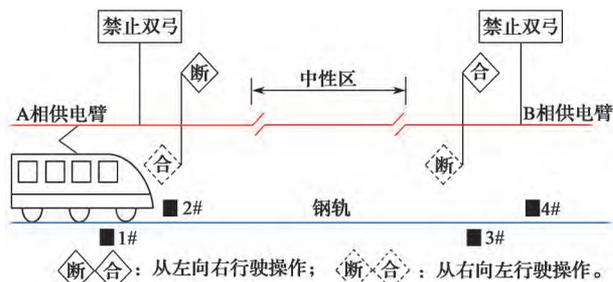


图 1 车载断电自动过分相示意图

以列车从左向右行驶为例, 当列车接收到 1# 传感器传来的过分相预告信号后, 车载控制装置封锁触发脉冲, 延时并保证在收到 2# 传感器信号之前分断主断路器, 使列车惰行通过中性区。当接收到 3# 传感器信号后, 控制列车自动将主断路器合闸, 顺序启动列车牵引传动系统^[3, 12]。

车载自动过分相装置具有无需人工干预、投资小

等优势, 但存在列车速度损失大、过电压冲击等缺点, 限制了高速、重载铁路的进一步发展。

3 地面自动过分相技术

地面自动过分相是通过安装在地面的装置给中性区供电, 实现列车在中性区不断电运行, 克服了上述过分相方式中因断电造成速度损失大的缺点, 并满足高速、重载铁路的要求, 是牵引供电系统发展趋势之一。地面自动过分相方式分为机械开关地面自动过分相、电子开关地面自动过分相和柔性地面自动过分相等方式。

3.1 机械开关地面自动过分相技术

3.1.1 国外机械开关地面自动过分相技术方案

日本是世界上最早研制成功并采用列车自动过分相技术的国家。1964 年日本研究设计的机械开关地面自动过分相技术实现了列车在不分断车载断路器的状况下, 瞬时失电 250~350 ms, 列车带电自动通过电分相^[13]。日本明电舍的机械开关自动过分相装置在新干线得到大量使用, 装机超过 400 套^[14]。

日本明电舍机械开关地面自动过分相系统采用计轴法或轨道电路的方式检测列车位置, 其系统主电路如图 2 所示。图 2 中 CB11 和 CB21 是主开关, CB12 和 CB22 是备用开关。当检测到列车到达分相区时, 通过真空开关的快速切换, 实现列车不断电自动过分相。当主开关发生拒分或拒合故障时, 备用开关保证整个系统仍能正常工作。

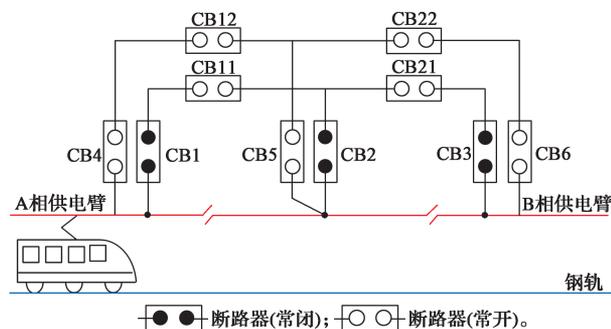


图 2 明电舍机械开关地面自动过分相系统接线图

该方案在列车全速行驶过中性区时, 会产生电弧, 致使列车过分相时产生过电压、过电流等暂态现象。日本大量文献研究表明, 安装 RC 装置可以有效抑制该过电压。文献 [15] 研究不同 R 、 C 取值对过电压的抑制作用不同, 通过仿真得出最佳抑制效果下的 R 、 C 值分别为 150Ω 和 $0.25 \mu\text{F}$ 。文献 [16] 应用一种基于光学电流传感器的保护继电器, 用于检测机械开关是否发生短路故障。

3.1.2 我国机械开关地面自动过分相技术方案

1998 年由西安铁路局科研所研发的地面自动过分相系统装置, 在大坡度、重载的宝成线观音山分区所成功投运, 正常瞬间失电 $(0.13 \pm 0.02) \text{ s}$ ^[17]。该系统由列车运行位置识别、系统逻辑控制、操作执行装

置、远端信息采集、接触网转换区以及列车适应性改造6个子系统组成^[18]。系统主接线如图3所示, 1ZK, 2ZK是2台主用真空断路器, 3ZK, 4ZK, 11ZK, 22ZK是4台备用的真空断路器, 1JY, 2JY分别是接触网绝缘锚段关节处的空气绝缘, 1GK, 2GK, 3GK, 4GK, 5GK分别为电动隔离开关, 还有3台避雷器及2台电压互感器。

当列车将驶入中性区时, 控制真空断路器1ZK闭合, A相电源接入中性区给列车供电; 当列车驶入中性区时, 控制真空断路器1ZK断开, 在 (0.13 ± 0.02) s失电后, 控制2ZK真空断路器闭合, 实现列车过中性区不断电运行; 当列车离开中性区时, 控制真空断路器2ZK断开, 实现复位, 为下次列车过分相做准备。当系统发生故障时, 启动备用真空断路器, 在 (0.4 ± 0.05) s时进行装置的转换与运行。与日本明电舍的机械开关地面自动过分相方案相比, 该方案的断电时间较短。

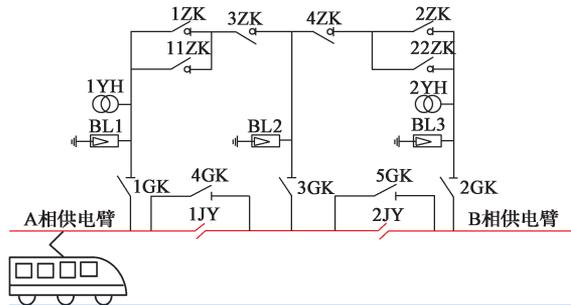


图3 西安铁路局科研所地面自动过分相系统接线图

3.2 电子开关地面自动过分相技术

由于机械开关地面自动过分相存在死区时间长、开关寿命短、开关切换时产生过电压等问题。采用电子开关（如晶闸管串联阀组）代替机械开关, 充分利用电子开关在电流过零时自然关断, 可有效解决机械开关带来的操作过电压等问题。目前, 以日本、西班牙、韩国、中国等国家为代表, 国内外许多公司对电子过分相技术进行研究。

3.2.1 国外地面自动过分相技术方案

机械开关在列车每次过分相时都进行分合闸操作, 动作频率高, 容易造成电气设备故障, 为此, 东海道新干线变电所于2005年引入静止型转换开关(Thyristor changeover switch, THS)。由于THS使用晶闸管组件, 无需限制动作次数, 不会产生高频过电压^[19]。当THS和RC装置并用时, RC的连接会影响THS开关开断状态, 妨碍THS的正常工作, 文献[20]中针对该问题研究出一种回路结构, 运行THS时, 采用断路器QF1切断RC装置, 防止THS故障; 闭合QF1使RC装置连接到供电臂, 可抑制备用开关VS切换时产生的过电压, 其系统结构如图4所示。文献[21]研究转换开关的分合相位对列车主断路器励磁涌流的影响, 通过控制最佳分合相位可以减小列车主断路器产生的励磁涌流。

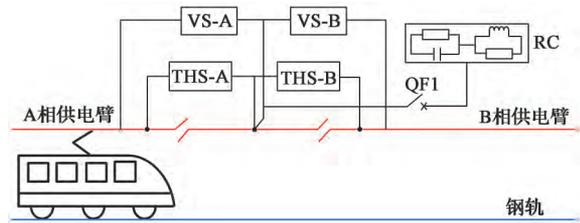


图4 静止开关与RC并用的系统结构

在日本静止型转换开关的基础上, 西班牙蒙德拉贡大学开发了一套应用于高速铁路的试验样机, 该试验样机的静态开关采用双向晶闸管串联实现。每个静态开关由3个堆栈单元串联构成, 每一个堆栈单元由7个双向晶闸管构成, 共使用42个双向晶闸管, 每个双向晶闸管的额定电压为6500V。最大开关时间为0.3ms, RC缓冲电路的R和C分别为 150Ω 和 $1\mu\text{F}$ ^[22]。

3.2.2 我国电子开关地面自动过分相技术方案

国内电子开关地面自动过分相技术研发单位主要以北京交通大学、中车株洲电力机车研究所有限公司（简称中车株洲所）等科研单位为代表。北京交通大学的电子开关地面自动过分相系统结构如图5所示。每一个电子开关中串联的反并联晶闸管单元的数量为26个, 设置4个冗余, 增加系统的鲁棒性。每个单元包括2个反并联的晶闸管、缓冲电路、散热器、击穿检测电路。电子开关可以承受高达109kV的电压, 击穿检测电路用于检测击穿故障单元, 有利于维修^[8]。当检测到列车将进入中性区后, 控制电子开关SCR-V1导通, A相供电臂给中性区供电; 当检测到列车完全在中性区时, 控制电子开关SCR-V1关断, 然后控制SCR-V2导通, 由B相供电臂继续为中性区供电, 实现列车不断电通过电分相; 当列车离开电分相后, 控制SCR-V2关断, 使电子开关复位, 为下次列车过分相做准备。

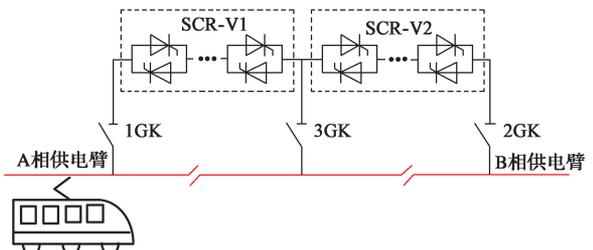


图5 电子开关地面自动过分相系统结构（北京交通大学）

中车株洲所的电子开关地面自动过分相装置已于2018年6月在神朔铁路投入正式运行, 并取得良好效果, 其结构与北京交通大学的方案类似, 区别在于受电弓检测方式和集成方式不同。

3.3 柔性地面自动过分相技术

3.3.1 国外柔性地面自动过分相技术方案

文献[23]中提出一种新型的新干线中性区电源切换系统(Changeover Section Power System, CSPS), 主电路如图6所示。当列车进入中性区后, 中性区的电压由VVVF逆变器控制, 并且中性区电压逐渐从一相供电臂电压转换为另一相供电臂电压, 实现列车在分相区不断电运行。该方案能有效抑制浪涌电压, 没

有电瞬态现象，但由于该方案采用电压和相移控制、负载转移控制和输出限制控制，控制复杂，不易于实现，没有得到推广应用。

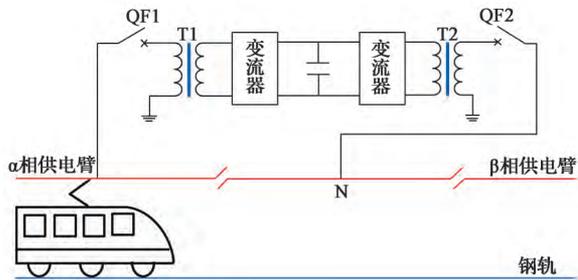


图6 中性区电源切换系统主电路

3.3.2 我国柔性地面自动过分相技术方案

电子开关地面自动过分相是一种快速切换供电电源的解决方案。为进一步提升地面自动过分相性能，清华大学、中车株洲所、中国船舶重工集团公司七一二研究所（以下简称712所）等单位对柔性地面自动过分相技术进行研究。

清华大学提出多种柔性过分相方案：文献[24]提出一种模块化多电平结构的柔性地面自动过分相方案，通过变频器移相技术实现两供电臂之间的电压切换，实现列车不断电、全功率过分相，该方案无需变压器；文献[25-26]提出一种新的不断电过分相与电能质量综合补偿装置，同时解决了电分相和电能质量问题；文献[27]提出了一种将两变压器绕组与变流器输出绕组串联接到中性区的方案，该方案具有所需变流器容量小的优点。

712所也提出柔性自动过分相方案，系统结构如图7所示，该系统主要由2个断路器（QF1, QF2），3个变压器（T1, T2, T3）和交直交变流器构成，逆变器输出绕组与变压器T3二次侧绕组串联，2个绕组输出的电压合成（下文称合成电压）后为中性区供电。当列车即将驶入中性区时，断路器QF1闭合，控制合成电压与A相电压相同后为中性区供电；当列车完全驶入中性区时，控制合成电压通过变频移相技术将A相电压变换成与B相电压相同后为中性区供电；当列车驶出中性区时，控制断路器QF1断开，使柔性自动过分相装置复位，为下次过分相做准备。该方案通过合成电压为中性区供电，变压器T3承担一部分容量，可使变流器的容量减小。但该方案受牵引变电所变压器的接线方式影响，不同接线方式变流器的容量不同。

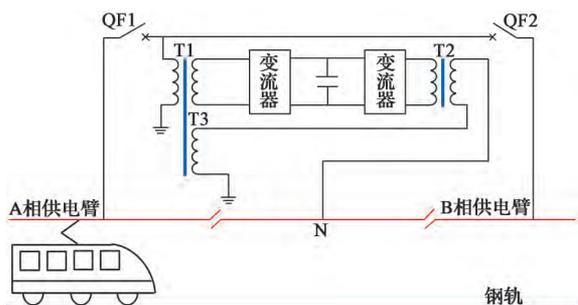


图7 712所柔性过分相系统结构

为进一步减小变流器容量，中车株洲所提出一种新型柔性地面自动过分相方案，系统结构如图8所示，工作原理与712所方案类似，但该方案将变压器T2的高压绕组与A相侧和B相侧的二次侧绕组串联，3个电压合成后为中性区供电，这样可以很大程度上减小变流器的容量，并且不受牵引变电所变压器接线方式的影响，适用范围广。

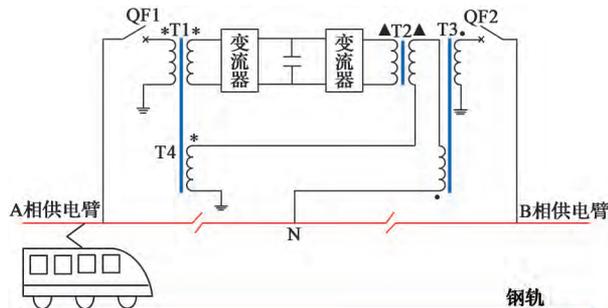


图8 中车株洲所柔性过分相系统结构

4 虚拟同相柔性供电技术

同相供电系统是指为牵引负荷提供电能的接触网具有相同电压、相同相位的牵引供电系统^[28-30]。我国学者和研究单位一直致力于同相供电系统研究，其中以李群湛教授团队研发的单相组合式同相供电方案和单三组合式同相供电方案为代表，并在实际工程中应用^[31]。运行结果表明同相供电系统具有以下优势：可以取消变电所出口电分相；提高牵引变压器容量利用率；综合解决以负序为主的电能质量问题。但这2种方案仍存在分区所^[31-32]。

为了解决上述2种方案存在的问题，将同相供电系统与柔性地面自动过分相系统相结合构成虚拟同相柔性供电系统，其主电路如图9所示。该系统主要由变电所同相供电系统和分区所柔性地面自动过分相系统构成。在虚拟同相柔性供电系统中，同相供电系统主要由交直交变流器构成。交直交变流器的结构可以为级联H桥交直交拓扑、二极管钳位交直交拓扑或MMC拓扑结构。柔性地面自动过分相系统通过变频器移相技术实现供电臂之间的切换，实现列车不断电过分相。该方案同时解决电分相和电能质量问题，是未来电气化铁路的发展趋势之一。

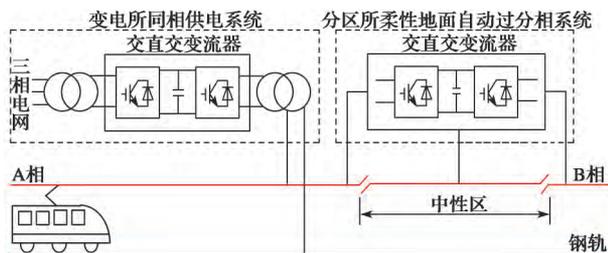


图9 虚拟同相柔性供电系统主电路

5 结论

本文对电气化铁路自动过分相技术进行了介绍，总结了几种过分相方式的发展现状。机械开关地面自

动过分相存在断电时间长、机械开关寿命短等问题; 电子开关地面自动过分相一定程度上缩短了失电时间; 柔性自动过分相能完全实现列车不断电过分相, 具有很大的发展前景。

未来电气化铁路会朝着高速和重载的方向发展, 为了解决电分相和电能质量问题, 需从两方面来考虑: 一方面, 虚拟同相柔性供电技术为解决上述问题提供了新思路; 另一方面, 采用贯通式同相供电, 不仅实现无电分相供电, 而且还能实现三相电网与牵引网解耦和增强供电能力, 这也是未来电气化铁路发展的关键技术之一。

参考文献:

- [1] 冯金柱. 世界电气化铁路的发展 [J]. 电气化铁道, 2001(4): 1-7.
- [2] 中国铁路总公司 2017 年统计公报 [EB/OL]. [2019-02-12]. http://www.china-railway.com.cn/cpyfw/tjxx/201803/t20180328_70388.html.
- [3] 黄沁悦. 地面自动过分相技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [4] 钱清泉, 高仕斌, 何正友, 等. 中国高速铁路牵引供电关键技术 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 9-20.
- [5] 张健. 器件式电分相改造为关节式电分相施工方案探讨 [J]. 电气化铁道, 2018(2): 51-52.
- [6] 刘云. 锚段关节式接触网分相过电压的研究与抑制措施 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [7] 刘雨欣, 张景景. 三断口八跨锚段关节式电分相过电压分析 [J]. 电气化铁道, 2017(3): 67-70.
- [8] 冉旺. 基于电流信息的列车不断电过分相技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [9] 董志杰. 地面自动过分相技术及方案研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [10] 杜玉亮. 列车辅助系统不断电技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] 姚孝刚. 自动过分相系统设计与改进 [J]. 机车电传动, 2009(4): 41-43.
- [12] 敖晓峰, 刘仕兵. 车载断电自动过分相装置 [J]. 电气化铁道, 2006(2): 5-7.
- [13] 罗文骥, 谢冰. 电气化铁道地面带电自动过分相系统技术的研究与应用 [J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(增刊 1): 27-33.
- [14] 刘冰. 电子开关实现带电自动过分相的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [15] 持永芳文, 安喰浩司, 石川荣, 等. 新幹線切替用真空開閉器の高周波再発振抑制と抑制方法 [J]. 電気学会論文誌 D, 1991, 111(9): 777-784.
- [16] 安喰浩司, 持永芳文, 兎束哲夫, 等. 新幹線切替開閉器電極間短絡故障に伴う回路現象解析と故障検出継電器の開発 [J]. 電気学会論文誌 B, 2002, 122(4): 498-505.
- [17] 汪亚平. 我国自主研发的地面控制自动过分相技术创新 [J]. 中国铁路, 2011(1): 76-79.
- [18] 罗文骥. 用于地面带电自动过分相的智能选相真空断路器的研究 [J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(4): 62-66.
- [19] 鈴木直樹, 久野村健, 甲斐正彦, 等. 静止形切替用開閉器導入における電力補償装置が発生する高部波電流に関する検討 [C]// 電気学会. 平成 28 年電気学会産業応用部門大会. 東京: 電気学会, 2016: 191-192.
- [20] 鈴木直樹, 久野村健, 甲斐正彦, 等. 静止形切替用開閉器導入に伴う CR 装置の併用に関する検討 [C]// 電気学会. 平成 28 年電気学会全国大会. 東京: 電気学会, 2016: 261-262.
- [21] AJIKI Kohji, MOCHINAGA Yoshifumi, UZUKA Tetsuo, et al. Investigation of Shinkansen static changeover switch capable of suppression of exciting inrush current into transformer on train [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 121(3): 340-346.
- [22] DELGADO E, AIZPURU I, CANALES J M, et al. Static switch based solution for improvement of neutral sections in HSR systems [C]// IEEE. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. Bologna: IEEE, 2012: 1-6.
- [23] HAYASHIYA H, UEDA Y, AJIKI K, et al. Investigation of closing surge in Shinkansen power system and proposal of a novel power electronics application for changeover section [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 126(7): 857-864.
- [24] 田旭, 姜齐荣, 魏应冬. 基于两相式模块化多电平变流器的电气化铁路不断电过分相装置拓扑研究 [J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2901-2906.
- [25] 田旭, 姜齐荣, 魏应冬, 等. 电气化铁路不断电过分相与电能质量补偿装置研究 [J]. 电工电能新技术, 2018, 37(4): 49-56.
- [26] 田旭, 姜齐荣, 魏应冬, 等. 复线牵引网不断电过分相与电能质量补偿装置研究 [J]. 矿业科学学报, 2018, 3(4): 378-385.
- [27] TIAN X, JIANG Q R, WEI Y D. Research on novel railway uninterruptible flexible connector with series-connected transformers and back-to-back converter [C]// IEEE. 2013 IEEE ECCE Asia Downunder. Melbourne: IEEE, 2013: 111-116.
- [28] 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.
- [29] 李群湛, 连级三, 高仕斌. 高速铁路电气化工程 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006: 155-166.
- [30] 李群湛. 牵引变电所电气分析及综合补偿技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 72-93.
- [31] 沈文韬. 单三相组合式同相供电试验与改造方案研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [32] 周方圆, 陈鹏, 吴丽然. 单相交流牵引供电系统关键技术现状及发展 [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(1): 1-5.

作者简介: 胡家喜 (1978—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为大功率变流技术和电气传动系统技术。