

悬挂式单轨车高压母线电路设计的分析与探讨

吉安辉¹, 丁俊², 陈新溅¹, 张宾¹, 朱东坡¹, 王龙¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司 轨道交通技术中心, 湖南 株洲 412001;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266111)

摘 要: 为避免悬挂式单轨车在通过导电轨无电区时可能出现的失电情况, 推荐了2种列车高压母线电路设计方案, 并对采用这2种方案的单轨车通过不同无电区时供电站和主熔断器的电流变化情况进行了分析及对比。对比结果表明, 仅对辅助电源系统和空调设备设置高压母线和牵引系统采用微制动技术的方案较优, 推荐采用该方案。

关键词: 悬挂式单轨车; 无电区; 高压母线电路; 微制动; 城市轨道交通

中图分类号: U239.5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.04.020

Analysis and Discussion on High Voltage Bus Circuit Design of Suspension Monorail Vehicle

JI Anhui¹, DING Jun², CHEN Xinjian¹, ZHANG Bin¹, ZHU Dongpo¹, WANG Long¹

(1. Technology Center, Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: In order to avoid the possible power loss of suspended monorail vehicles when passing through the non-electric zone of conductive rails, two high-voltage bus circuit designs were recommended, and the current changes of the power supply station and the main fuse were analyzed and compared when the monorail vehicles passing through different non-electric zones. The comparison result showed the design that traction system adopting the slight braking and high-voltage bus setting only for auxiliary power system and air-conditioning equipment is better and worth to recommend.

Keywords: suspension monorail car; non-electric zone; high-voltage bus circuit; slight braking; urban rail transit

0 引言

城市轨道交通中的悬挂式单轨车作为单轨交通的主要形式之一, 在国外已经发展了一百余年并具有批量成熟应用业绩, 在国内近年才开始逐步发展。悬挂式单轨交通具有车辆爬坡能力强、曲线通过半径小、造价低、占地面积小及对城市景观影响较小的特点^[1]。

悬挂式单轨车采用导电轨进行供电, 而导电轨由于受到道岔、折返线或者变电所供电设计影响, 会存在长短不一的无电区。因此悬挂式单轨车的高压母线的设计需充分考虑供电轨的无电区, 以确保单轨车在通过无电区时平稳运行、所有设备正常工作。

1 悬挂式单轨特点

1.1 车辆特点

悬挂式单轨车为3辆编组配置, 编组型式为

收稿日期: 2019-02-13; 修回日期: 2019-06-18

+Mc1-M0-Mc2+, 其中 Mc1 车、Mc2 车为带司机室的动车, M0 车为动车, 列车编组示意图如图 1 所示。列车采用受流器供电方式, 每辆车设有 2 个转向架, 每个转向架的两侧分别设置 1 台正极受流器和 1 台负极受流器, 额定工作电压为 DC 750 V。

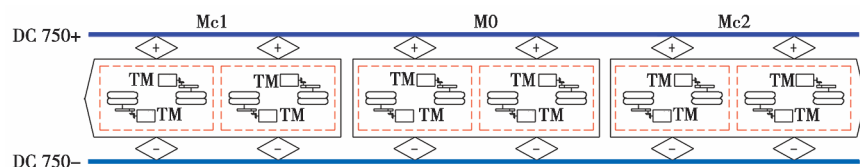


图 1 悬挂式单轨车编组示意图

1.2 导电轨特点

悬挂式单轨车所使用的轨道梁是底部开口的钢制箱型梁, 如图 2 所示^[2]。在轨道梁箱体内部两侧分别设有正极导电轨、负极导电轨, 用以给运行中的车辆进行供电。

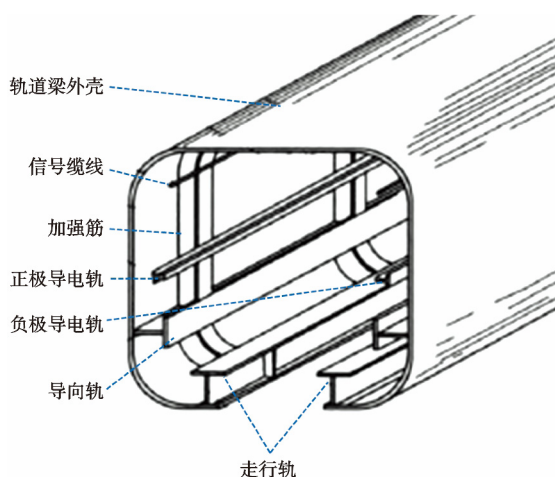


图 2 悬挂式单轨轨道梁示意图

1.3 导电轨无电区特点

导电轨作为单轨车的供电轨, 应尽可能地连续敷设, 避免分断。但是由于受到道岔、折返线或者变电所供电设计影响, 导电轨需要设置电分断区, 因此产生了导电轨无电区。如图 3 所示, 根据供电系统的设计, 导电轨无电区主要分为以下 2 种:

①等电位无电区: 无电区两端的导电轨是由同一个供电站或者 2 个供电站共同进行供电, 并且通过电缆短接在一起, 因此其两端电位相等, 如道岔、折返段以及正线上的无电区。

②非等电位无电区: 无电区两端的导电轨是由 2

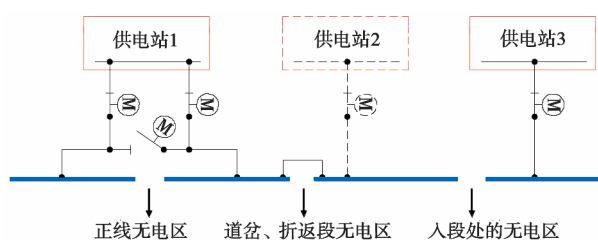


图 3 导电轨无电区示意图

个供电站分别进行供电, 且没有通过电缆连接在一起, 因此其两端电位不相等, 如入段处的无电区。

2 悬挂式单轨车高压母线设计分析

2.1 悬挂式单轨车高压母线设计方案

悬挂式单轨车高压母线的设计需充分考虑到导电轨上存在的无电区, 避免列车在通过无电区时, 牵引系统、辅助电源系统等设备由于短时失电而给列车运行带来不利影响, 如列车运行不平稳, 空调及照明等设备停止工作, 牵引及辅助电源系统设备损坏等。针对上述问题, 悬挂式单轨车采用设置高压母线的方案来解决列车过无电区时可能存在的失电问题, 推荐的高压母线设计方案有以下 2 种:

①高压母线方案一: 对牵引系统、辅助电源系统及空调设备均设置了高压母线。当列车通过无电区时, 全列车只要有 1 组受流器接触到导电轨, 就可以保证全列车所有设备的用电需求。高压电路原理图如图 4 所示。

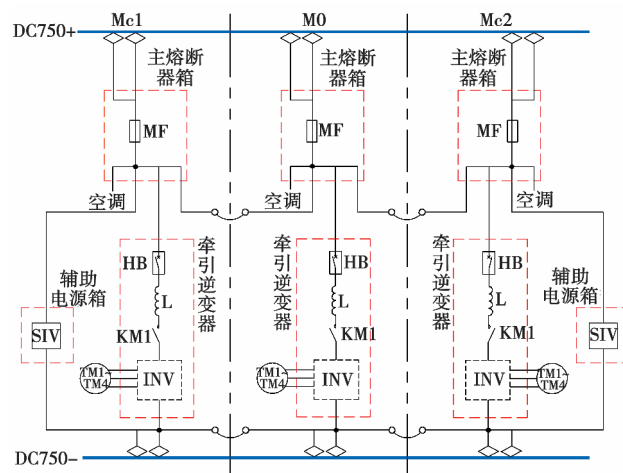


图 4 高压母线方案一原理图

②高压母线方案二: 仅对辅助电源系统、空调设备设置高压母线。高压电路原理图如图 5 所示。当列车通过无电区时, 全列车只要有 1 组受流器接触到导

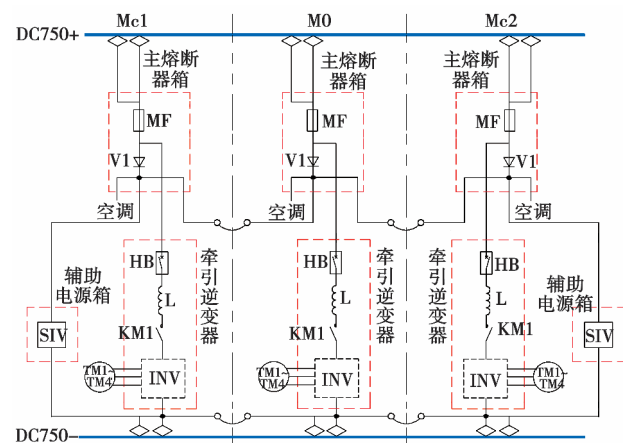


图 5 高压母线方案二原理图

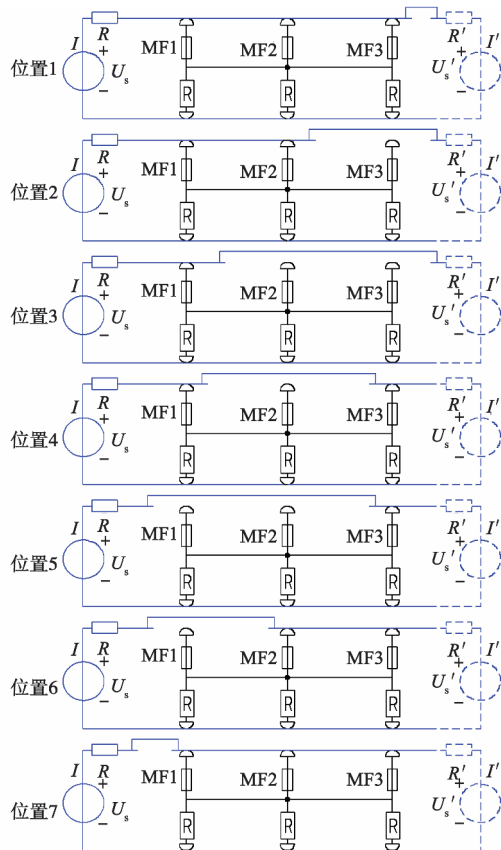
电轨, 就可以保证全列车除牵引系统以外设备的用电需求; 牵引系统针对短时失电情况将采用微制动技术, 在通过无电区时, 牵引系统通过检测输入电压的变化情况会自动进入无电区模式^[3], 并自动施加轻微电制动来保持输入回路的电压在正常工作范围内, 待通过无电区后自动退出该模式并可以迅速恢复到正常工作状态。

2.2 悬挂式单轨车过无电区分析

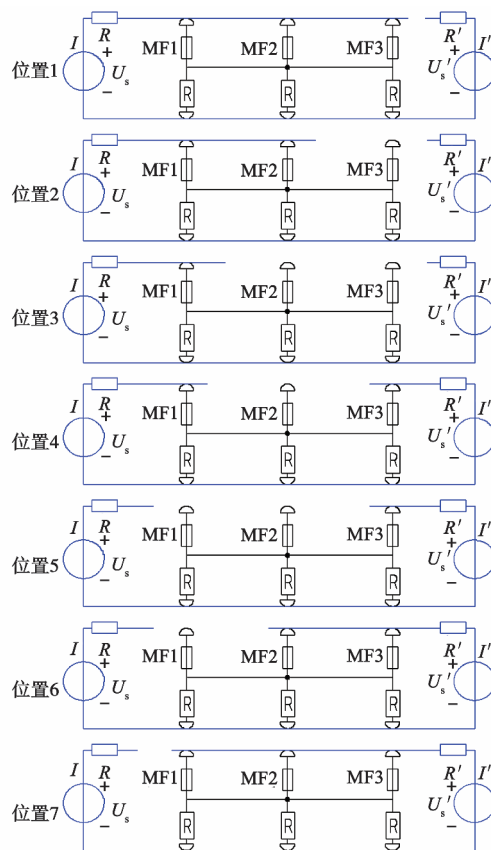
悬挂式单轨车的单节车辆长度约为 10 m, 列车长度约为 30 m。每辆车上设有 2 个转向架, 受流器安装在转向架的中心位置, 其间距约为 6 m。导电轨无电区的最大长度约为 18 m。悬挂式单轨车通过导电轨无电区时的相对位置如图 6 所示。

假设悬挂式单轨车的总电流为 I , 牵引系统的工作总电流为 I_1 , I_1 的数值较大并且会随着列车的状态不同 (如速度、载荷、级位等) 而变化; 辅助电源系统及空调设备的工作总电流为 I_2 , I_2 的数值较小且较稳定; 并且存在关系 $I=I_1+I_2$ 。当悬挂式单轨车由 2 个供电站同时供电时, 由于 2 个供电站至无电区的位置不同, 其线路电阻也不同, 故两个供电站的供电电流存在差异, 设供电站 1 与供电站 2 (或供电站 3) 的供电电流比例为 A 。

针对采用上述 2 种高压电路方案的悬挂式单轨车,



(a) 悬挂式单轨车通过等电位无电区简化电路图



(b) 悬挂式单轨车通过非等电位无电区简化电路图

图 7 采用高压母线方案一的简化电路图

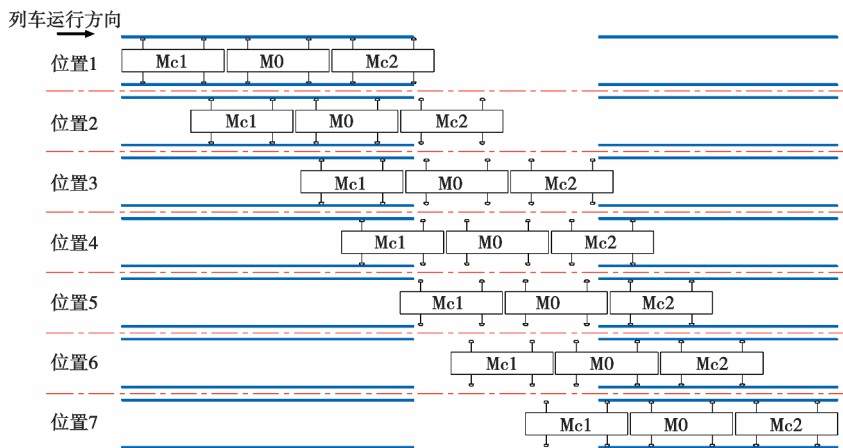


图 6 悬挂式单轨车过无电区示意图

其通过无电区时的相关分析如下。

1) 采用高压母线方案一的悬挂式单轨车过无电区分析

①通过等电位无电区

当悬挂式单轨车在通过等电位无电区时, 结合悬挂式单轨车高压母线设计方案一的高压电路原理图, 简化后的电路原理图如图 7(a) 所示。

悬挂式单轨车通过等电位无电区不同位置时, 供电站电流及流经 3 个主熔断器的电流变化情况见表 1。

②通过非等电位无电区

当悬挂式单轨车在通过非等电位无电区时, 结合悬挂式单轨车高压母线设计方案一的高压电路原理图, 简化后的电路原理图如图 7(b) 所示。

表 1 悬挂式单轨车通过等电位无电区时
相关电流变化情况

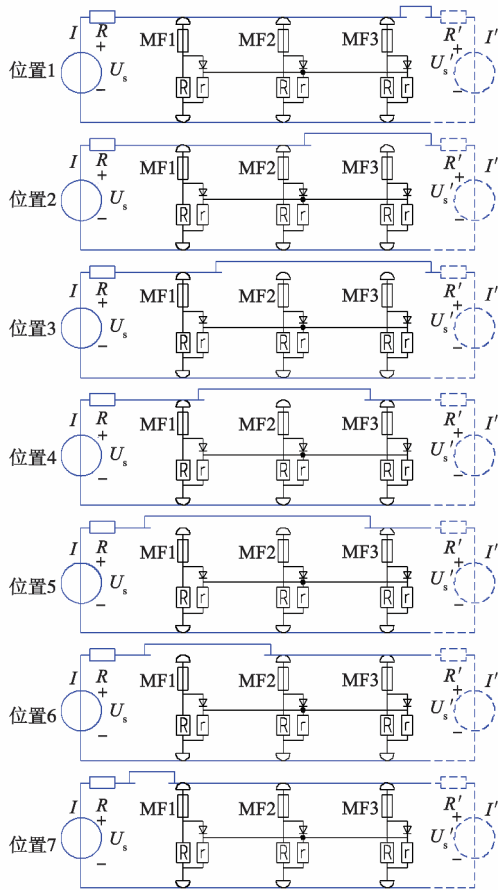
列车 位置	单个供电 站供电时	2 个供电站 供电		MF1 电流	MF2 电流	MF3 电流
	供电站 1 电流	供电站 1 电流	供电站 2 电流			
位置 1	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$
位置 2	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{1}{2}I$	$\frac{1}{2}I$	0
位置 3	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	I	0	0
位置 4	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{1}{2}I$	0	$\frac{1}{2}I$
位置 5	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	0	0	I
位置 6	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	0	$\frac{1}{2}I$	$\frac{1}{2}I$
位置 7	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$

悬挂式单轨车通过非等电位无电区不同位置时，供电站电流及流经 3 个主熔断器的电流变化情况见表 2。

2) 采用高压母线方案二的悬挂式单轨车过无电区分析

①通过等电位无电区

当悬挂式单轨车在通过等电位无电区时，结合悬



(a) 悬挂式单轨车通过等电位无电区简化电路图

表 2 悬挂式单轨车通过非等电位无电区时
相关电流变化情况

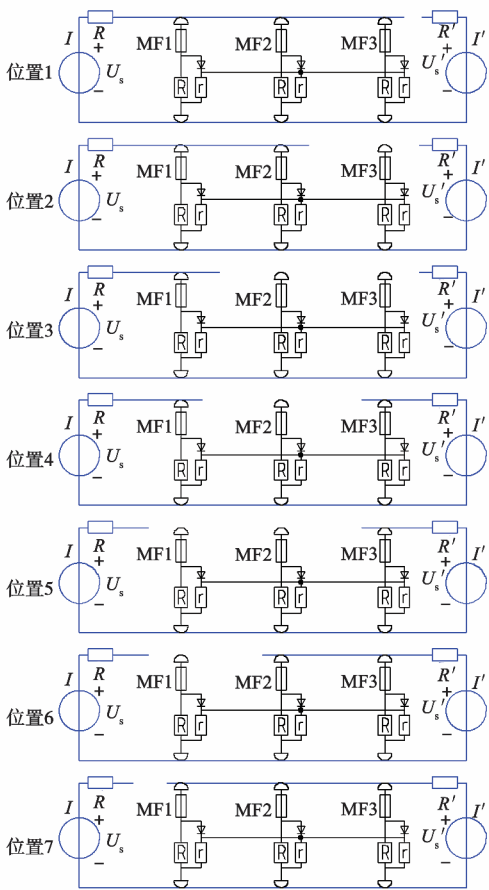
列车 位置	供电站 1 电流	供电站 3 电流	MF1 电流	MF2 电流	MF3 电流
位置 1	I	0	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$
位置 2	I	0	$\frac{1}{2}I$	$\frac{1}{2}I$	0
位置 3	I	0	I	0	0
位置 4	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{A}{1+A}I$	0	$\frac{1}{1+A}I$
位置 5	I	I	0	0	I
位置 6	I	I	0	$\frac{1}{2}I$	$\frac{1}{2}I$
位置 7	I	I	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$

挂式单轨车高压母线设计方案二的高压电路原理图，简化后的电路原理图如图 8(a) 所示。

悬挂式单轨车通过等电位无电区不同位置时，供电站电流及流经 3 个主熔断器的电流变化情况如表 3 所示。

②通过非等电位无电区

当悬挂式单轨车在通过非等电位无电区时，结合悬挂式单轨车高压母线设计方案二的高压电路原理图，简化后的电路原理图如图 8(b) 所示。



(b) 悬挂式单轨车通过非等电位无电区简化电路图

图 8 采用高压母线方案二的简化电路图

表 3 悬挂式单轨车通过等电位无电区时相关电流变化情况

A

列车位置	单个供电站供电	2 个供电站供电		MF1 电流	MF2 电流	MF3 电流
	时供电站 1 电流	供电站 1 电流	供电站 2 电流			
位置 1	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$
位置 2	$\frac{2}{3}I_1+I_2$	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	0
位置 3	$\frac{1}{3}I_1+I_2$	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{1}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{1}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{3}I_1+I_2$	0	0
位置 4	$\frac{2}{3}I_1+I_2$	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	0	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$
位置 5	$\frac{1}{3}I_1+I_2$	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{1}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{1}{3}I_1+I_2\right)$	0	0	$\frac{1}{3}I_1+I_2$
位置 6	$\frac{2}{3}I_1+I_2$	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	0	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$
位置 7	I	$\frac{A}{1+A}I$	$\frac{1}{1+A}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$

悬挂式单轨车通过非等电位无电区不同位置时, 供电站电流及流经 3 个主熔断器的电流变化情况如表 4 所示。

表 4 悬挂式单轨车通过非等电位无电区时相关电流变化情况

列车位置	供电站 1 电流	供电站 3 电流	MF1 电流	MF2 电流	MF3 电流
位置 1	I	0	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$
位置 2	$\frac{2}{3}I_1+I_2$	0	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	0
位置 3	$\frac{1}{3}I_1+I_2$	0	$\frac{1}{3}I_1+I_2$	0	0
位置 4	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{A}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	$\frac{1}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$	0
位置 5	0	$\frac{1}{3}I_1+I_2$	0	0	$\frac{1}{3}I_1+I_2$
位置 6	0	$\frac{2}{3}I_1+I_2$	0	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$	$\frac{1}{3}I_1+\frac{1}{2}I_2$
位置 7	0	I	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$	$\frac{1}{3}I$

2.3 2 种高压母线方案对比分析

根据上文中对分别采用 2 种高压母线方案的悬挂式单轨车过无电区的分析结果, 对比分析情况如表 5 所示。

根据表 5 中对比可知, 悬挂式单轨车采用高压母线方案二并配合微制动技术, 具有以下优点:

①对主熔断器箱电缆和熔断器、高压母线电缆的负荷容量要求较小, 有利于系统设备的长期稳定运行;

②可以适应的供电轨无电区长度更长, 适用性更广;

③通过线路无电区时, 各供电站的直流电流增量变化较小, 不易引起供电站误动作保护, 因此与供电站的保护配合更优;

④在通过两端导电轨未连接的无电区时,

表 5 高压母线方案对比分析

项点	高压母线方案一	高压母线方案二
主熔断器箱的电缆及熔断器选型	额定电流按照 $\frac{1}{3}I$ 考虑; 短时最大电流按照 I 考虑	额定电流按照 $\frac{1}{3}I$ 考虑; 短时最大电流按照 $\frac{A}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$ 考虑, 最大电流约为 $\frac{2}{3}I_1+I_2$
高压母线电缆选型	短时最大电流按照 $\frac{2}{3}I$ 考虑	短时最大电流按照 $\frac{2}{3}I_2$ 考虑
主熔断器箱配置	无需配置二极管	需配置二极管
供电站电流变化	最大直流电流增量为 $\frac{A}{1+A}I$, 最大约为 I	最大直流电流增量为 $\frac{1}{1+A}\left(\frac{2}{3}I_1+I_2\right)$, 最大约为 $\frac{2}{3}I_1+I_2$
可适用的无电区长度	无电区最大长度不超过列车首尾 2 个受流器之间的长度	因采用微制动技术, 列车可以依靠惯性通过较长的无电区, 因此可适用的无电区长度可以超过列车长度
对列车速度的影响	无影响	因为采用微制动技术, 所以列车速度会轻微降低
对不同供电区的影响	在经过不同供电区之间的无电区时, 会将 2 个供电区连接在一起	在经过不同供电区之间的无电区时, 不会将 2 个供电区连接在一起

(下转第 101 页)

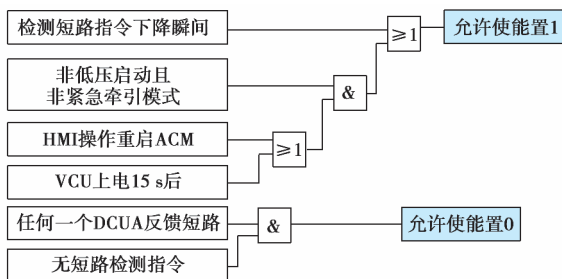


图8 ACM启动使能的逻辑条件

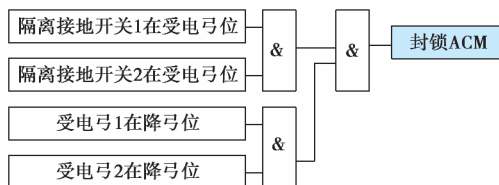


图9 封锁所有ACM的逻辑条件

3.4 中压接触器的控制

中压接触器由TCMS控制。TCMS上电后工作于正常状态,在TCMS发出启动ACM命令之前,TCMS首先闭合中压接触器,并保持持续闭合;一旦中压接触器由于某种原因断开,TCMS将不再闭合,除非TCMS重启。

TCMS诊断出以下条件之一满足时,断开中压接触器:①TCMS判断中压接触器反馈状态与命令状态不一致;②TCMS收到任一DCUA发出的外部短路故障信号;③TCMS掉电或故障,接触器断开;④当中压接触器110V供电电源掉电时,接触器断开。

驾驶员可以在显示屏相应界面上了解到中压接触器的闭合状态及故障状态。列车出库前若中压接触器自检不通过,维护人员可以试图修复故障。

3.5 参与并网控制的短路检测流程

DCUA一旦检测到短路,无论任何位置出现短路,DCUA都会对短路状态反馈信号“发生外部短路”置高,并发送给TCMS。TCMS立即对指令信号“变流器启动指令”置低,并持续4s,将信号发送给4个变流器,然后TCMS断开中压母线接触器,之后在2s内立即发出“检测短路位置指令”。DCUA一旦接收到“检测短路位置指令”,断开与其相连的负载接触器,然

后启动变流器,以此来确定短路是否发生在当地ACM内部。若内部短路,TCMS通过复位“变流器启动指令”禁止短路的变流器重新启动。

如果未检测到内部短路,则可能存在外部母线短路。TCMS将尝试以正常启动逻辑启动变流器。一旦TCMS再次收到“发生外部短路”信号,TCMS将禁止同一中压段的所有变流器启动,并报告该中压段有外部短路,同时不再启动内部短路检测流程。

当检测步骤完成后,变流器开始并网启动流程。

4 结语

分析并网供电的分时顺序启动控制原理,详细解析某城市轨道交通列车上应用的辅助供电系统并网供电控制算法,此控制算法能够控制所有辅助变流器顺序启动,实现并网供电,并且设置的中压母线接触器将中压母线分成独立的两部分,最大化地利用负载,保证列车运行的稳定性和安全性。目前此控制算法在某城市的地铁车辆上应用情况良好。

参考文献:

- [1] 李铁斌. 中压交流并网供电技术在地铁列车上的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 121-125.
- [2] 程永道. 城轨车辆辅助电源系统供电方式与电路拓扑结构分析[J]. 机车电传动, 2013(2): 49-52.
- [3] 许杰, 杨川, 李宇. 基于TCMS的列车辅助变流器启动及复位方法研究[J]. 铁路计算机应用, 2018(2): 11-16.
- [4] 阎纯洁. 城轨列车辅助系统交流供电方式的分析与比较[J]. 科技创新与生产力, 2015(4): 86-87.
- [5] 李拥军. 长沙地铁二号线一期工程辅助供电系统设计[J]. 现代物业·新建设, 2014, 13(6): 149-151.
- [6] 严刚刚. 地铁列车中中压交流并网供电技术的应用浅析[J]. 建材与装饰, 2015(18): 194-195.
- [7] 龚文斌, 张卫东. Alstom地铁列车中压辅助供电形式的性能比较及优化[J]. 仪表技术, 2011(1): 57-60.
- [8] 李网生, 陈爱林, 芮国强, 等. 地铁车辆辅助电源的设计[J]. 机车电传动, 2009(3): 51-53.

作者简介: 宋君君(1986—), 女, 工程师, 从事列车网络控制系统相关技术研究。

(上接第97页)不会将高压电从有电区域带入无电区域,对用户使用更安全。

3 结语

根据对采用上述2种高压母线方案的单轨车通过不同无电区时供电站和主熔断器的电流变化情况的分析及对比,最终推荐方案为仅针对辅助电源系统、空调设备设置高压母线和牵引系统采用微制动技术。该方案对牵引系统高压器件负荷容量要求较小,可以适应的供电轨无电区长度更长,与供电站的保护配合更

优,对用户使用更安全。

参考文献:

- [1] 李芾, 许文超, 安琪. 悬挂式单轨车的发展及其现状[J]. 机车电传动, 2014(2): 16-20.
- [2] 白雪, 李芾. 悬挂式单轨车的应用分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(2): 1-4.
- [3] 陈超录, 陈建校. 城市轨道交通DC 750V第三轨供电列车电气牵引系统过无电区分析[J]. 科技资讯, 2011(22): 143.

作者简介: 吉安辉(1989—), 男, 工程师, 主要从事轨道车辆牵引电传动系统研发工作。