

厦门地铁 1 号线辅助供电系统相电流不平衡故障分析与改进

刘 超 张红星 高兴华 王景波

(中车唐山机车车辆有限公司,063035,唐山//第一作者,高级工程师)

摘 要 针对厦门地铁 1 号线运营过程中发生的辅助供电系统相电流不平衡故障问题,从网络系统控制并网供电逻辑、辅助供电系统诊断功能等角度进行分析。结果表明,中压母线车端连接器缩针是导致辅助供电系统相电流不平衡故障的根本原因。并提出了辅助供电系统分为两个车辆单元分别控制并网的认进方案。

关键词 城市轨道交通;辅助供电系统;相电流不平衡

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.040

Analysis and Improvement of Phase Current Imbalance Fault of Xiamen Metro Line 1 Auxiliary Power Supply System

LIU Chao, ZHANG Hongxing, GAO Xinghua, WANG Jingbo

Abstract Aiming at the phase current imbalance fault of the auxiliary power supply system that occurred during Xiamen Metro Line 1 operation, by analyzing from the angles of grid connected power supply logic and diagnostic functions of auxiliary power supply system, the real cause of the phase current imbalance is obtained. Results show that the medium voltage bus line vehicle-end connector needle is the root cause of the auxiliary power supply system phase current imbalance fault, and optimization scheme is proposed, in which the auxiliary power supply system is divided into two vehicle units to control grid connection respectively.

Key words urban rail transit; auxiliary power supply system; phase current imbalance

Author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

辅助供电系统是城市轨道交通车辆控制中低压用电设备供电的重要组成部分。目前,德国西门子股份公司、阿尔斯通公司和庞巴迪公司等供应商主要采用中压并网供电技术。其配合列车控制与

管理系统(TCMS)的管理实现了负载利用率最大化;在某些辅助逆变器故障情况下可通过其余辅助逆变器确保空调系统的运行,保障了乘客舒适性。但列车受实际运营环境的干扰,并网供电控制过程也可能受到影响^[1-3]。本文主要针对厦门地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)列车发生的辅助供电系统相电流不平衡故障进行分析,并重点阐述故障改进方案,从而保障列车安全有效地运营。

1 辅助供电系统简介

辅助供电系统对于列车功能至关重要,它给其他重要的设备和系统,如空气压缩机、牵引设备风机以及空调系统供电。为保证辅助供电系统的最大可用性,6 节编组列车一般配备 4 台辅助逆变器和 2 台低压电源兼作蓄电池充电机。辅助逆变器采用三相 AC 380 V、50 Hz 电源满足空调和空气压缩机等设备用电需求;低压电源兼作蓄电池充电机为蓄电池和所有的控制电路及 TCMS 等提供 DC 110 V 电源^[4-5]。4 台辅助逆变器采用先进的并网供电技术,这保证了即使在某台逆变器故障时,整列车的辅助负载不需要任何降级。辅助供电系统在列车中控制分布如图 1 所示。

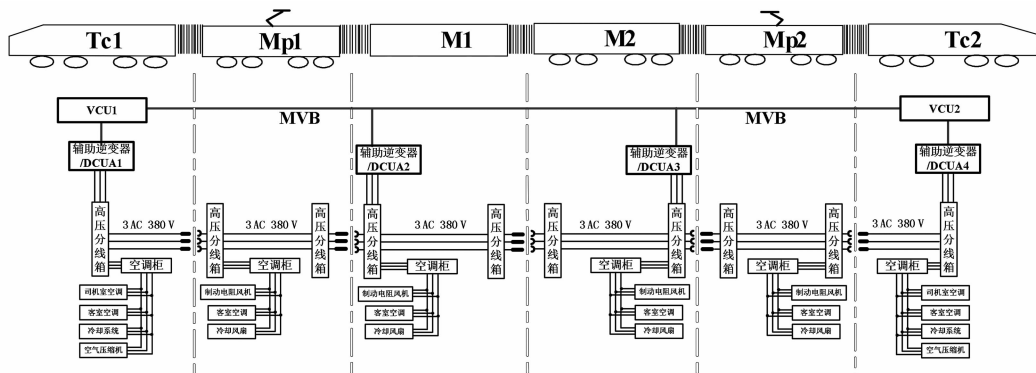
2 故障分析

2.1 故障现象

2018 年 4 月 5 日,1 号线辅助供电系统报出相电流不平衡故障而导致车辆下线。故障当天下载的列车数据记录仪中的记录数据如图 2 所示。由图 2 可知,在 10:57:01:521 时,列车中 DCUA 诊断出“1 车相电流平衡故障保护性封锁请求”,随后其他车也上报了该故障。在 10:57:07:281 时,TCMS 也诊断出“1 车 DCUA 作为主启动失败故障”。

2.2 控制原理

1 号线列车辅助供电系统采用的是并网供电控



注: Tc 为带司机室的拖车; Mp 为有受电弓的动力车; M 为无受电弓的动力车; MVB 为多功能车辆总线; VCU 为车辆控制单元; DCUA 为辅助变流器驱动控制单元。

图 1 辅助供电系统控制框图

Fig. 1 Block diagram of auxiliary power supply system control



图2 列车故障记录截图

Fig. 2 Screenshot of train fault record

制方式。其通过 TCMS 控制并网供电的 DCUA 实现辅助逆变器的并网启动。TCMS 控制 DCUA 启动的输出信号主要有“禁止空闲启动指令”及“禁止启动指令”两个。其中,“禁止空闲启动指令”用于主辅助逆变器的选定,“禁止启动指令”用于主/从辅助逆变器的启动控制。针对 DCUA 的并网启动控制,在软件设计中考虑了 DCUA 切除控制、DCUA 复位控制、DCUA 主控制、DCUA 从控制、DCUA 封锁控制及 DCUA 故障下的减载控制等,从而确保列车交流负载和直流负载的正常供电,保障列车安全舒适的运行。

在存在多个 DCUA 并网供电的情况下,TCMS 通过 DCUA 控制辅助逆变器并网启动,其主要控制逻辑如下:

1) 在启动之前,TCMS 通过向所有的 DCUA 发送“禁止空闲启动指令”为 1”以及“禁止启动指令”为 1”禁止它们的启动。

2) TCMS 指定某 DCUA 为主 DCUA,向其发送“‘禁止空闲启动指令’为 0”及“‘禁止启动指

令'为 0"来启动该 DCUA。该 DCUA 将尝试在母线空闲的情况下启动,如果启动不成功,则 TCMS 将指定另一台 DCUA 为主 DCUA。

3) 当三相中压母线达到标称电压之后,主 DC-
UA 向 TCMS 反馈“‘ACM(交流电源模块)母线激
活’为 1”。之后 TCMS 向其他 DCUA 依次发送
“‘禁止启动指令’为 0”来实现同步启动。

4) 当任一个 DCUA 已经处于工作状态, 和三相母线完成同步, 并闭合负载接触器之后, 向 TCMS 发送“‘普通母线上 ACM 激活’为 1”。

在紧急牵引模式下,辅助逆变器的并网控制通过硬线实现,TCMS 不参与控制。

2.3 原因分析

根据故障现象,本文主要从网络系统控制并网供电逻辑、辅助供电系统诊断功能角度分析故障原因。

2.3.1 网络系统角度分析

根据上述控制原理,网络系统控制并网供电时,与 DCUA 相关的列车运行状态数据在数据记录仪中的记录状态如图 3 所示。

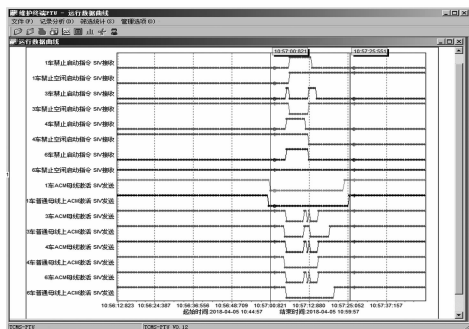


图 3 列车运行状态数据截图

Fig. 3 Screenshot of train operation status data

列车发生故障前,辅助供电系统的各 DCUA 均工作正常,TCMS 正常发送“‘禁止空闲启动指令’为 0”及“‘禁止启动指令’为 0”的信号状态给 1 车 DCUA。当故障发生时,结合图 2 中列车故障数据和图 3 中列车运行状态数据,故障产生过程分析如图 4 所示。

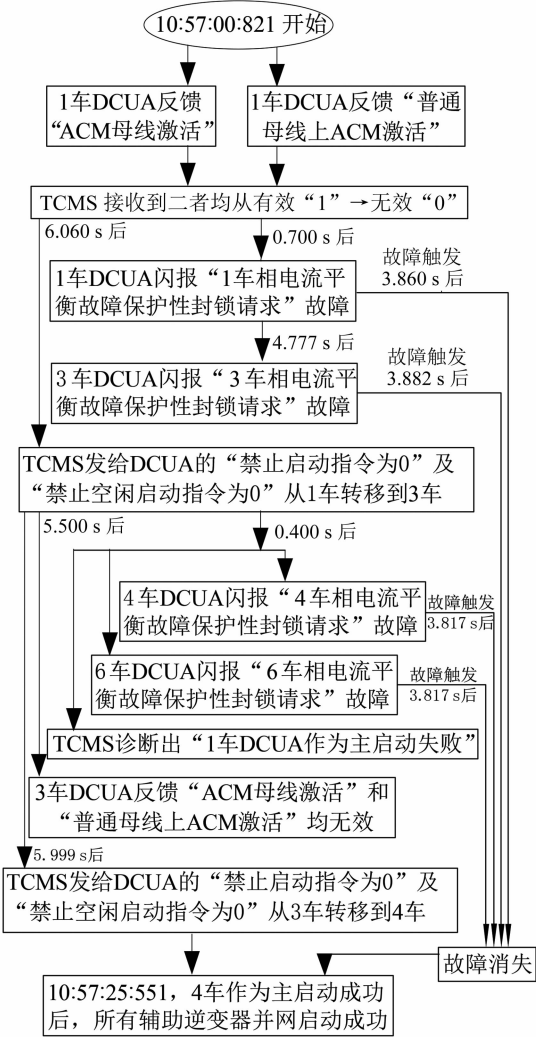


图 4 故障产生过程分析

Fig. 4 Analysis of fault occurrence process

综上分析,在列车发生“相电流平衡故障保护性封锁请求”故障时,TCMS 按照正常并网供电控制启动时序迅速将主启动指令转移到下一个 DCUA,实现了 TCMS 对 DCUA 的正常启动控制;在辅助供电系统反馈故障信息时,TCMS 快速诊断并在司机显示屏上正常提示了“x 车 DCUA 作为主启动失败故障”。

2.3.2 辅助供电系统角度分析

为了防止辅助逆变器损坏,辅助供电系统会根

据发生故障的等级进行自身保护。如发生相电流不平衡的故障时,辅助供电系统会进行保护性封锁即封锁变流器。根据司机指南和维修操作指南,初步分析 DCUA 可能存在如下故障原因:① 辅助变频器外负载不平衡,如过高的单相负载;② U 相电流测量故障;③ V 相电流测量故障;④ 辅助变频器内三相系统电缆故障等。

故障发生当日列车回库后上车检查车辆,通过检查连接器及负载设备状态、电流传感器状态、每个辅助负载接触器及内部线缆状态等均未发现异常。随后对故障列车跟踪检查,通过反复故障模拟实现了相电流不平衡故障的复现。故障复现后,在检查连接器及负载设备状态过程中,发现 2 车与 3 车间高压分线箱 AC 380 V 母线连接器存在 W 相缩针,进而导致连接器烧损现象。

辅助供电系统设计中利用电流传输器测量 U 相和 V 相的电流,根据三相电流相加为 0 的算法,DCUA 持续计算 W 相的电流。U 相和 V 相电流的准确监测是保护逆变器的基础,保护功能在 DCUA 控制单元内执行,如果相电流之间差值超过了限额且持续时间超过了监控时间,则会触发三相不平衡或负载不平衡故障,DCUA 则开始对逆变器执行保护性封锁并发送诊断信息。

可见,高压分线箱 AC 380 V 母线连接器中 W 相缩针导致连接处的中压母线缺相,进而使得相电流之间差值超过了限额,造成辅助变频器外负载不平衡,从而导致 DCUA 诊断出相电流平衡故障保护性请求封锁,辅助供电系统封锁辅助逆变器,进而影响列车的正常运营。

3 改进方案

3.1 硬线控制改进

考虑对箱体施工的影响以及改进周期,本项目改进方案是将贯穿整车的 AC 380 V 中压母线分为两个车辆单元,改进后的辅助供电系统控制如图 5 所示。在图 5 中,3 车与 4 车之间高压分线箱处用于车端连接的线缆被拆除,列车中压母线被分成 1~3 车和 4~6 车 2 个单元,每个单元包含 2 台辅助逆变器,为本单元交流负载供电。当中压母线上单点出现故障时,对应单元的辅助逆变器会封锁输出,整列车将损失 2 台辅助逆变器,但不会导致整列车辅助电源停止工作。这既可以避免列车三相不平衡造成的列车无法运营,又降低了改造箱体的难度和安全隐患。

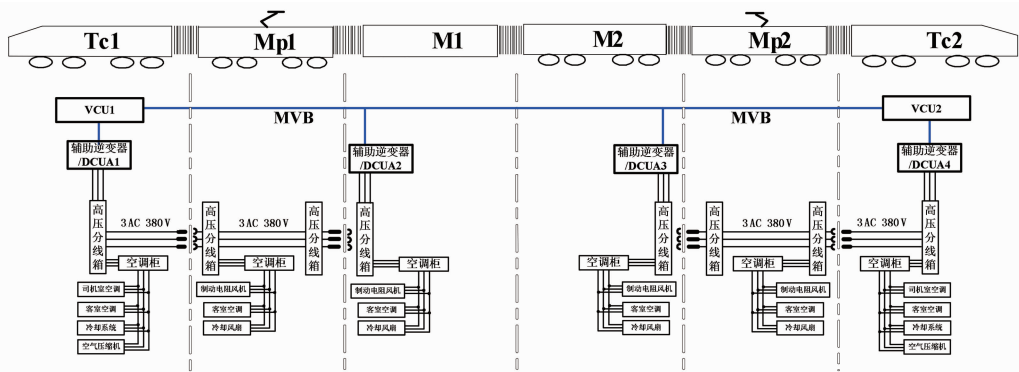


图 5 改进后的辅助供电系统控制框图

Fig. 5 Block diagram of improved auxiliary power supply system control

3.2 网络控制改进

3.2.1 并网供电控制逻辑优化

目前并网供电控制逻辑为网络 TCMS 控制 4 台辅助逆变器依次并网。根据改进方案,网络 TCMS 需分别控制每个车辆单元内的 2 台辅助逆变器

并网启动,即在单元内 TCMS 先指定一台辅助逆变器为主辅助逆变器并向其发送禁止空闲启动指令和禁止启动指令,然后向本单元内另一台辅助逆变器发送禁止启动指令。两个单元分别并网供电控制程序如图 6 所示。

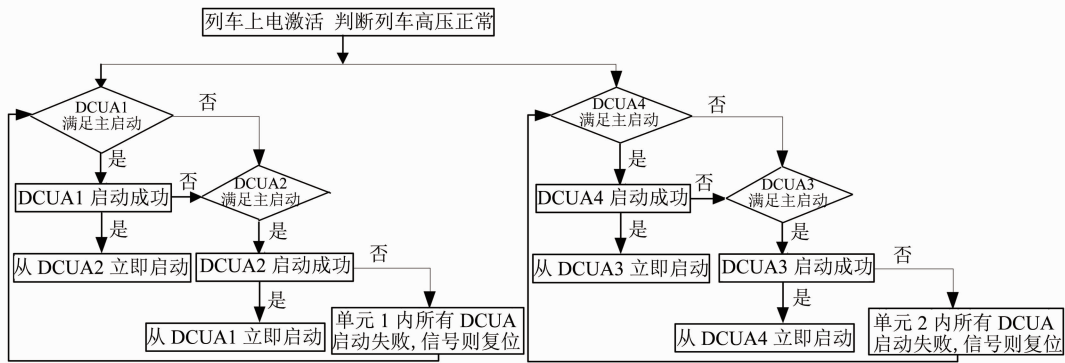


图 6 两个单元分别并网供电控制程序

Fig. 6 Grid connected power supply control of two units respectively

针对图 6 中两个单元分别并网供电控制时,每个单元内的 DCUA 是否满足主启动的判断过程如图 7 所示。其中:

- 1) 高压输入正常的判断条件是:辅助供电系统任一控制单元反馈网压成功。
- 2) 封锁所有 DCUA 的判断条件是:隔离接地开关在受电弓位且受电弓在降弓位。
- 3) 本 DCA 工作正常的判断条件是:辅助供电系统反馈设备工作正常。
- 4) 本 DCUA 启动使能的判断条件是:非紧急牵引模式且无蓄电池低压启动且本 DCUA 无内部或外部短路故障。
- 5) 本 DCUA 作为主启动故障的判断条件是:TCMS 发送禁止空闲启动指令和禁止启动指令后 6

s 内未收到本 DCUA 反馈的母线激活。

针对图 6 中 2 个单元分别并网供电控制时,每个单元内的 DCUA 作为从启动需同时满足以下判断条件:① 高压输入正常为真;② 封锁所有 DCUA 为假;③ 本 DCUA 工作正常为真;④ 本 DCUA 启动使能为真;⑤ 本 DCUA 作为主启动故障为假;⑥ 其他任一 DCUA 为主启动成功为真;⑦ 本 DCUA 反馈母线激活为假。

3.2.2 负载管理优化

整车 AC 380 V 中压母线被分为 2 个车辆单元,其辅助逆变器的冗余性减弱。网络软件中,空压机打风逻辑和空调减载控制逻辑需根据列车中压母线供电状态进行适应性优化。列车中负载能耗需求如表 1 所示。

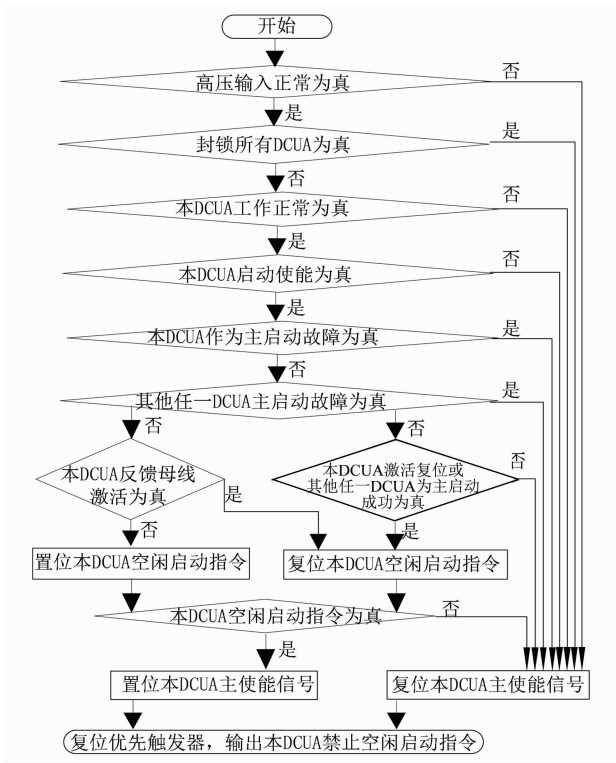


图 7 DCUA 满足主启动的判断流程

Fig. 7 Flow chart of DCUA satisfying main initiation judgement

表 1 列车负载能耗需求

Tab. 1 Requirements of train load energy consumption

交流负载分类	负载设备名称	单个负载容量/kVA	数量/个	整车负载总和/kVA	负载投入季节
空调系统	压缩机(制冷)	10.550	24	253.20	夏季
	通风机	1.000	24	24.00	夏/冬季
	冷凝风机	1.000	24	24.00	夏季
	司机室通风机	0.185	2	0.37	夏/冬季
冷却系统	制动电阻风扇	1.390	4	5.56	夏/冬季
	牵引冷却风扇	1.830	6	10.98	夏/冬季
风源	空气压缩机	11.820	2	23.64	夏/冬季
其他	电热玻璃	1.250	2	2.50	冬季
	插座	2.300	6	13.80	夏/冬季
	蓄电池充电机	12.350	2	24.70	夏/冬季
总计				380.25	夏季
				105.55	冬季

本项目辅助供电系统设计为单台辅助逆变器在风机半速时容量为 117 kVA, 即列车总容量为 117 kVA×4=468 kVA; 单台辅助逆变器在风机全速时容量为 150 kVA, 即列车总容量为 150 kVA×4=600 kVA。根据表 1 中整车负载能耗需求以及改进后的并网供电控制方案, 遇到辅助逆变器故障时, 每个车辆单元内的负载管理方案优化如下:

3.2.2.1 夏季遇到辅助逆变器故障

夏季每个车辆单元内, 列车 AC 380 V/220 V 交流负载容量需达 190.125 kVA, 辅助逆变器才正常运行。风机半速情况下, 列车可提供 234.000 kVA 的容量, 完全可满足列车 190.125 kVA 的交流负载需要。

1) 一台辅助逆变器发生故障。故障辅助逆变器所在车辆单元内另一台辅助逆变器容量可以提升到 150.000 kVA, 但仍无法满足一个车辆单元内 190.125 kVA 的辅助负载需求, 因此优化方案中需网络给故障辅助逆变器所在车辆单元内的空调系统发送减载指令, 使空调系统减载 50% 运行。空调减载后该单元内的交流负载为 126.825 kVA, 单台辅助逆变器容量满足此功率要求。无故障车辆单元内空调系统保持正常工作。

2) 两台辅助逆变器发生故障。当两台故障辅助逆变器在同一个车辆单元内, 则本单元交流负载将停止工作, 网络给该车辆单元内空调系统发送紧急通风指令; 同时如果该车辆单元内的空气压缩机为主空气压缩机, TCMS 将变更主、从空气压缩机指定逻辑, 即指定另一车辆单元内的空气压缩机为主空气压缩机; 当两个故障辅助逆变器分别在两个车辆单元内, 此时 TCMS 给全列空调系统发送减载指令, 使空调系统减载 50% 运行。

3) 三台辅助逆变器发生故障。优先考虑空压机打风需求, TCMS 给全列空调发送紧急通风指令。

4) 四台辅助逆变器故障, 列车请求救援。

3.2.2.2 冬季遇到辅助逆变器故障

冬季每个车辆单元内, 列车 AC 380 V/220 V 的交流负载容量需达 52.775 kVA。

1) 一台辅助逆变器发生故障。故障辅助逆变器所在车辆单元另一台辅助逆变器容量为 117.000 kVA, 满足负载需求, 空调系统工作状态不受影响。

2) 两台辅助逆变器发生故障。当两台故障辅助逆变器处在同一个车辆单元内, 负载管理策略与夏季时一致; 当两个故障辅助逆变器分别在两个车辆单元内, 空调系统工作状态不受影响。

3) 三台或四台辅助逆变器故障, 负载管理策略与夏季时一致。

4 结语

通过对厦门地铁 1 号线辅助供电系统相电流不

(下转第 204 页)