

有轨电车混合动力系统容错控制方法研究

李 明, 石俊杰, 汪星华

(中车唐山机车车辆有限公司 产品技术研究中心, 河北 唐山 063035)

摘 要: 为保证混合动力有轨电车高效、可靠运行, 针对有轨电车混合动力系统的常见故障情况进行了梳理, 提出了相应的容错控制方法, 为提高混合动力有轨电车动力性、安全性及可靠性提供了一套有效的解决方案。

关键词: 有轨电车; 混合动力系统; 容错控制; 故障模式; 故障检测

中图分类号: U482.1; U239.5 **文献标识码:** A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.04.019

Study on Fault-tolerant Control Measures of Hybrid Power System for Tramcar

LI Ming, SHI Junjie, WANG Xinghua

(R & D Center, CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China)

Abstract: Frequent failures of hybrid power system and corresponding fault-tolerant control measures which ensured the tramcar running safety and reliability was studied, and an effective scheme to improve the power performance, security and reliability of the hybrid system was proposed.

Keywords: tramcar; hybrid power system; fault-tolerant control; failure mode; failure detection

0 引言

近年来, 100% 低地板混合动力有轨电车因其便利、节能减排的绿色交通方式, 已进入蓬勃发展阶段^[1-2]。西门子、阿尔斯通、庞巴迪、安萨尔多、卡福等公司均研制了这类车型, 市场推广效果极佳。在其运行过程中, 混合动力系统由于受车辆、线路、气候等条件的影响, 其状态参数将随行驶里程的增加而变化, 故障率逐渐增加, 导致动力性、可靠性将逐渐下降, 对列车的运行能耗、运输效率、运输成本及环境造成了极大的影响。

混合动力系统设计之初, 只考虑了利用 2 种储能部件复合供电, 提高工作可靠性的问题, 没有从超级电容模组或动力电池模组内部的故障检测和控制方面进行优化设计。本文提出的容错控制技术是近年来研

究的热点技术之一, 对提高复杂系统的安全性和可靠性具有重要的作用^[3-4]。本文针对电源箱、网络、电机等关键子系统的故障情况进行了总结梳理, 重点针对有轨电车混合动力系统提出了不同故障模式的检测、诊断方法及相应的容错控制策略, 形成了一套运用容错控制技术来提高有轨电车混合动力系统安全可靠性的设计方法。

1 混合动力系统介绍

本文开发的 100% 低地板有轨电车, 可在不架设电网线路区段, 利用动力电池和超级电容提供牵引动力, 其主电路原理框图如图 1 所示。车辆共装备 2 套混合动力系统, 每套系统包括 1 个超级电容箱 (Maxwell 超级电容, 48 V、165F 模组, 11 串 2 并) 和 1 个动力电池箱 (湖州微宏钛酸锂电池, 2.7 V、10 Ah 单体, 144 串 3 并)。

其混合动力供电策略为: 在接触网有电时, 由接

触网为牵引变流器供电,脱离接触网或接触网无电时,由超级电容和动力电池组通过 DC/DC 变流器分别向牵引变流器提供电源。超级电容具有比功率高、比能量低的特点,可满足坡道运行、启动加速等大功率需求;动力电池具有比能量高、比功率低的特点,可提供较长续驶里程。2 种能源互为补充,如其中一种出现故障,也可以靠另一种能源运行一段距离,这就大大优于靠单一能源无网运行的有轨电车。

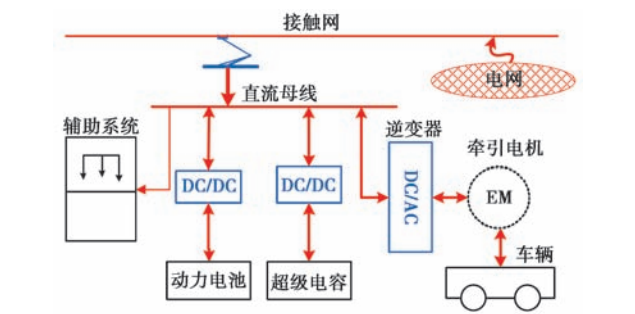


图 1 主电路原理框图

2 混合动力系统的故障分类

2.1 电源箱故障

混合动力系统电源箱由动力电池组与超级电容组成。当动力电池组或超级电容组发生故障时,供电系统将会发生故障,引起混合动力系统降功或停机,从而影响有轨电车的正常运行。本文通过测量电源箱故障相关参数,实现故障的诊断和预警^[5]。

2.1.1 动力电池组故障分类

动力电池组的具体故障情况如图 2 所示。

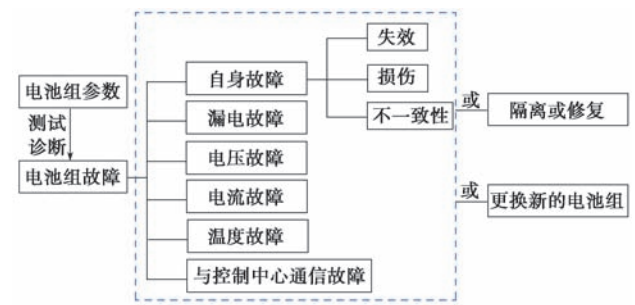


图 2 动力电池组主要故障

2.1.1.1 自身故障

1) 动力电池组的失效故障

电池失效是指失去充放电能力。其失效形式包括容量衰减过快、使用寿命变短、电池组中的一个或多个电池单元提前失效、电池极板或隔板活性物质脱落等,其实际工作中主要表现为容量降低、内阻过大、充放电温度过高等。失效原因包括电池内部活性物质导电能力变差、电池内部出现短路或断路现象、电池工作时温升过快等。当大量电池单体组合成电池组时,如其中某一个或多个电池单体失效,会加速整个电池组的失效。

2) 动力电池组的不一致故障

动力电池组的不一致性体现在各单体电压、电阻、

容量不同,其成因主要在于电池制造工艺的差别及电池长时间充放电带来的电池电压不一致。当出现电池组容量不一致现象时,随着电池频繁充放电,小容量电池会跟不上大容量电池的步伐,从而导致小容量电池过早被损坏,整个电池组的放电性能和散热也会因此降低。

通常测量锂电池的端电压作为诊断依据,当发现不一致的单体电池时,可以对这个单体电池进行检修后再使用,当其不能被修复时,要及时隔离更换。

3) 锂电池的损伤

当多次对电池过充过放时,逐渐累积的微小损伤,发展为电池故障,最终电池将不可修复。

2.1.1.2 动力电池电压和电流故障

动力电池控制单元负责接收电池传感器实时上传的电流值和电压值,并通过这 2 个值的波动来判断动力电池是否出现故障。以动力电池电压为例,动力电池电压检测故障包括电路断路和电压检测的精确度问题。为提高电压检测精确度,动力电池组被等分成多个组,检测系统对每个动力电池支路的电压和电池组总电压进行检测。若电压出现故障,动力电池组将把故障信息传递给控制中心并要求发出警报。

2.1.1.3 动力电池温度故障

包括不同部位温度不均或某个部位温度过高等问题。动力电池箱内一般会设置多个温度传感器,控制单元负责收集各传感器信号并控制冷却系统,如果检测到温度故障,控制单元将把故障信息上传给混合动力系统控制中心,做出降功或停机的决策。

2.1.1.4 动力电池漏电故障

当电源电极与绝缘电阻绝缘性低于规定的标准时,则会将该信息反馈至控制中心,传感器判定动力电池发生漏电情况,并做出停机的决策。

以上故障中,电池的性能参量状态变化及现象如表 1 所示。

表 1 电池损伤时的参量变化现象及诊断方法

物理参量	现象	诊断方法
温度变化	短时温度上升很快,然后趋于稳定	测量电池的温度
容量变化	电池容量降低	检测电池电压电流的变化
电压变化	闭路电压异常	在大电流充放电状态下检测电池单体电压
内阻变化	内阻增大	测量电池内阻

2.1.2 超级电容组故障分类

超级电容充放电速度较动力电池更快,充放电频率也更高,因此对超级电容故障的检测精度要求会更高。超级电容组同样会出现类似电池组的故障,通过对端电压、电流、温度等物理量的诊断,实现其容错控制^[6]。

2.2 网络控制系统故障

网络控制系统包括许多传感器、执行器以及其他