

动车组牵引供电系统故障模式影响与危害分析*

卢碧红, 张秉海, 曲宝章

(大连交通大学机械工程学院 大连, 116028)

摘要 对某动车组(electric multiple unit,简称 EMU)牵引供电系统故障模式影响与危害度进行研究,提高牵引供电系统的可靠性,进而提高高速列车运行可靠性。采用故障模式、影响及危害度分析(failure mode effect criticality analysis,简称 FMECA)的方法,提出了牵引供电系统的可靠性框图,根据 FMECA 方法对牵引供电系统的 16 种主要故障展开研究,从故障发生概率及其影响的严重程度两个维度得到牵引供电系统危害性矩阵。通过危害性矩阵分析得出绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor,简称 IGBT)模块监控起作用故障、变压器油泵 34-F55 跳开故障、制冷风扇故障和变压器油流故障等 4 种危害度较高的故障,并提出相应的改进措施。列车现场运行反馈结果表明,该措施保证了牵引供电系统的运用可靠性,研究成果为动车组其他子系统的故障分析、维修决策和寿命管理提供了技术支持。

关键词 牵引供电系统;故障模式、影响及危害度分析;危害度矩阵;动车组

中图分类号 U279; TM922; TH17

引言

高速铁路是铁路未来的发展方向,各国都投入大量人力物力进行高铁建设。近十年,我国高速列车得到了快速发展,但也暴露一些问题。例如,动车组可靠性故障会造成动车经常性的晚点以及运行安全报警等问题,给高铁的运营推广带来了阻力。牵引供电系统是动车组中最重要的子系统之一,牵引供电系统的可靠性直接影响动车组能否正常运营。

近年来,很多学校和企业对铁路牵引供电系统方面做出了大量研究。文献[1]以整条高速铁路所有牵引变电站的供电系统可靠性和铁路通过能力为评估对象,研究外部电力系统(发电厂、输电网、牵引变电站和接触网)对高速铁路牵引供电的可靠性,但没有对高铁内部的牵引供电系统故障做深入研究。文献[2]对动车组的牵引供电系统故障进行统计分析,得出接触网系统的故障占重要比重,应采取措施减小各种自然因素引起的故障,建立了较为完善的牵引供电系统故障统计表格,为提高电力牵引供电系统的供电可靠性提供了依据,但没有涉及故障模式及其影响方面的研究。文献[3]针对某一地铁典型牵引供电系统结构,利用故障树分析(fault tree

analysis,简称 FTA)和故障模式、影响及危害度分析对典型地铁牵引供电系统可靠性进行分析,在故障树图中划分出系统的最小割集,找出接触网系统与高压断路器、中压断路器是该地铁供电系统的薄弱环节;但是没有指出故障模式对系统的影响及危害度。文献[4]提出几种牵引供电系统的主要故障(高压电缆故障、雷击故障和电气绝缘故障)供电系统灵活性较差并提出解决措施,但没有指出这几种故障模式的危害度。

笔者通过运用 FMECA 对动车组牵引供电系统进行故障模式影响及危害度研究,实现牵引供电系统系统的可靠性增长,提高动车组的运营可靠性。

1 FMECA 技术

FMECA 起源于美国,FMECA 技术在 20 世纪 50 年代被首次用于美国战斗机操作系统的设计分析并取得了较好效果。它是对系统、部件和零件所有可能出现的故障模式进行分析,分析故障模式对上一级或总体的影响以及危害度,找出故障原因提出改进措施,为维修、寿命管理和研发设计提供依据。FMECA 有硬件法和功能法两种基本方法,硬件法是列出各个硬件产品,对所有潜在的故障模式

* 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01)

收稿日期:2014-01-27;修回日期:2014-06-25

进行分析,根据硬件产品的功能对每个故障模式进行评价。根据数据掌握的情况,评价又分定性和定量两种。笔者采用硬件法对牵引供电系统进行分析^[5-6]。

2 牵引供电系统结构层次框图和可靠性框图

牵引供电系统的主要工作任务是将电力系统的电能转变成适合动车组使用的电能。由于电能是动车组一切能量的来源,包括动力源、热源等,所以牵引供电系统是动车组最重要的子系统之一。

2.1 牵引供电系统结构层次框图

结构层次框图和可靠性框图是 FMECA 成功进行的关键。结构层次框图是为了确定或说明一个功能子系统或组件的相对复杂性。它根据需要,按产品的相对复杂层次从比较复杂的(系统)到比较简单的(零件)进行划分。

牵引供电系统主电路主要由高压电器系统、牵引变压系统、牵引变流器系统和牵引电机系统 4 个部分组成,各子系统是树状结构,如图 1 所示。某动车组的主电路是通过架设在 TC02 车车顶的受电弓从接触网接收 AC25 kV 的交流电,然后通过布置在车顶和车端的高压电缆将电能输送到装在 TC02 车下的牵引变压器,变压器的副边感应出 $4 \times 1\,550\text{ V}$ 的电压,并通过车辆间的连接馈线到设在动

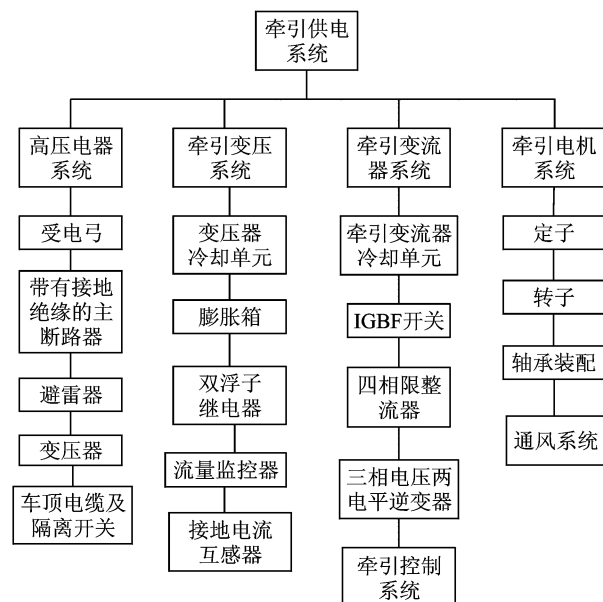


图 1 牵引供电系统结构层次框图

Fig. 1 Traction power supply system hierarchy diagram

车车下的变流器单元。变流器单元内部的四象限斩波器将 $1\,550\text{ V}$ 的交流电整流为 $2\,700\text{ V} \sim 3\,600\text{ V}$ 的中间直流电压。中间直流电压通过 PWM 变频单元向牵引电机提供变压变频(VVVF)的三相交流电源。其中,限压电阻接在中间直流电路的两极,防止出现过电压,辅助变流器的输入也取自中间直流环节。

2.2 牵引供电系统可靠性串联模型

可靠性框图是为每个寿命事件定义了所有系统功能或功能组合的许多相关和不相关的关系,因此提供了能够用做功能 FMEA 的相互依赖关系的确切^[7]。在一个系统中,任何一个单元(子系统或零部件)发生故障,都会导致整个系统发生故障,这种系统称为串联系统。如果将系统看作一根链条、各单元为链条中的一个环节,则其中任一环节断裂都会引起整个链条的失效。

串联系统的可靠度 R 等于各子系统可靠度 R_i 的乘积。当系统的故障规律服从指数分布时,系统故障率 λ 为各子系统故障率 λ_i 之和,其可靠性框图模型如图 2 所示。

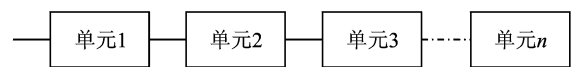


图 2 串联模型

Fig. 2 Series model

假设各单元寿命服从指数分布,则可靠度计算公式为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

系统可靠度 $R(t)$ 为各单元可靠度 $R_i(t)$ 之积

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2)$$

系统故障率 λ 为各单元故障率 $\lambda_i(t)$ 之和

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3)$$

系统平均故障间隔时间(平均寿命)为

$$MTBF = 1/\lambda \quad (4)$$

牵引供电系统可靠性框图(见图 3)以串联组合为主,每一个零件或部件的故障都会导致牵引供电系统的故障。可以看出,牵引供电系统的可靠度 $R(t)$ 不能高于各子系统中最小的可靠度 $R_i(t)$,而系统的故障率 λ 不低于各子系统中最高的故障率 $\lambda_i(t)$ 。笔者目的之一是找出故障率最高的子系统从而提高牵引供电系统的可靠性。

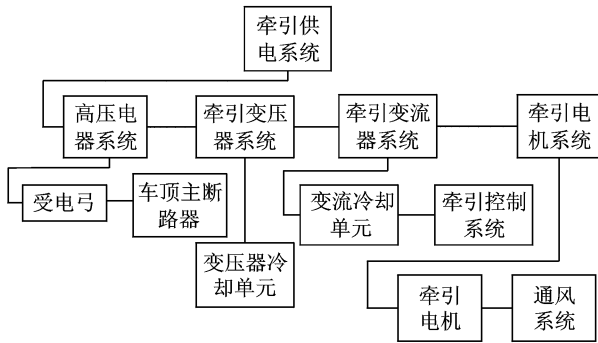


图 3 牵引供电系统可靠性框图

Fig. 3 Traction power supply system reliability block diagram

3 主要故障定性分析

3.1 故障模式概率等级划分原则

定性分析法根据故障模式发生的概率来评价 FMECA 中所确定的故障模式。将各故障模式出现的概率按一定的规定分成不同的等级。根据 EN 50126 标准和实际经验综合考虑铁路行业的特点^[8],事件发生的概率定义如表 1 所示。

表 1 故障模式发生概率等级划分表

Tab. 1 Fault model probability level

故障模式发生概率	故障模式出现次数百分比/%
频繁发生	≥20
很可能发生	10~20
偶尔发生	1~10
很少发生	0.1~1
极不可能发生	≤0.1

3.2 故障模式严重度等级划分

通常在进行 FMECA 分析时,根据故障对动车组造成的影响将故障进行严重等级定义^[9-10],用来评估危险事件发生时可能造成的危害程度。严重程度的级别和后果可由使用单位来定义,如果无明确定义,可按表 2 定义。A 类故障:可能导致系统功能丧失,危及行车安全,可能导致人员伤亡。B 类故障:影响行车安全,可能导致主要部件性能下降,且不能在短时间内回复。C 类故障:不影响行车安全,造成停驶或性能下降,可在短时间内回复。D 类故障:一般不会导致停驶或性能下降,不需要更换部件,可在短时间内轻易修复。

表 2 严重度等级定义

Tab. 2 Serious level definition

故障严重度等级	严重程度
A 类故障	动车组不能运营
B 类故障	动车组受限模式
C 类故障	动车组在最小受限模式下运营
D 类故障	动车组不降低运营速度运行

3.3 牵引供电系统故障模式分析

笔者依据车载信息故障数据源统计了某动车组运行某一段时间内牵引供电系统发生的故障,列出牵引供电系统中部分常见的 16 种故障模式、故障的原因、故障影响、改正措施以及故障发生概率,如表 3 所示,并根据故障对动车造成的影响进行分析。

3.4 牵引供电系统危害度矩阵

根据表 3 数据将故障模式以严重等级为横轴,事件发生概率为纵轴,做出危害度矩阵如图 4 所示,对角线表示危害性增长方向线。将本案例的 16 种故障模式分别填到矩阵中得到故障模式分布点。由故障模式分布点向危害性增长线做垂线,在危害性方向上离原点越远,表明该故障模式的危害程度越高。危害度矩阵提供了一种故障危害程度的排列次序,在有限条件下优先处理危害度较高的故障^[11]。

从危害度矩阵可以看出,1,9,11 和 8 这 4 种故障危害度较高,分别对应 IGBT 模块监控不起作用故障、变压器油泵 34-F55 跳开故障、制冷风扇故障和变压器油流故障。结合运用现场分别给出改进措施:更换 IGBT 模块、用软件将高压系统解锁、清理滤网及更换电机定子温度传感器。列车现场运行反

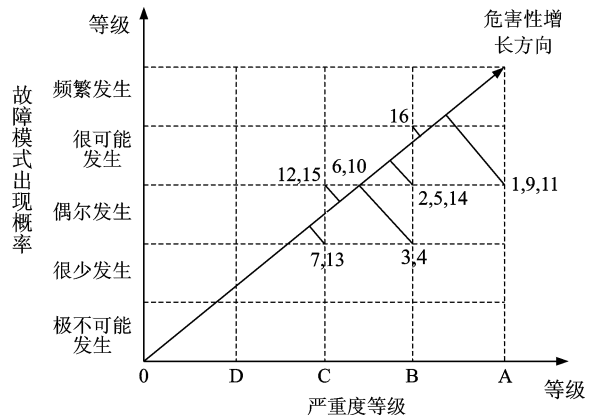


图 4 牵引供电系统危害度矩阵

Fig. 4 Harm degree matrix of traction power supply system

表3 牵引供电系统 FMECA 表格
Tab.3 Traction power supply system failure information

子系统名称	序号	故障模式	故障原因	故障影响	出现次数百分比/%	事件发生概率	严重等级	风险级别	改正措施
牵引控制系统	1	IGBT 模块监控不起作用		牵引系统失效,真空断路器断开	6.11	偶尔发生	A	不可容忍	更换 IGBT 模块
	2	MVB-PD 通信故障	TCU 的 MVB-PD 通信故障	牵引丢失	3.24	偶尔发生	B	不希望	切除牵引限速运行
	3	硬短路点火太频繁	硬短路点火太频繁	牵引切除运行	0.76	很少发生	B	不希望	切除牵引限速运行
	4	变流器接地故障	牵引变流器接地故障	影响运营秩序	0.38	很少发生	B	不希望	切除牵引限速运行
受电弓	5	受电弓接触片断裂	受电弓碳条故障	整列车真空断路器断开,所有受电弓降弓	4.77	偶尔发生	B	不希望	受电弓升弓被闭锁直至静止状态
	6	受电弓故障	受电弓故障	无法继续行驶	2.48	偶尔发生	C	不希望	换弓行驶
	7	受电弓处漏风	受电弓漏风	无法继续运行	0.95	很少发生	C	不希望	将其切除维持运行
变压器冷却单元	8	变压器油流故障	变压器冷却液流量故障	断开 VCB 真空断路器无法闭合	5.92	偶尔发生	A	不可容忍	
	9	变压器油泵 34-F55 跳开	变压器油泵 34-F55 跳开	主断断开	0.38	很少发生	A	不希望	用软件将高压系统解锁
	10	冷却水泵故障	冷却水泵故障	一个牵引单元失效	2.67	偶尔发生	C	不希望	复位
	11	制冷风扇故障	制冷风扇故障	变压器输出降低,高压单元故障	1.72	偶尔发生	A	不可容忍	清理滤网
车顶主断路器	12	真空断路器故障	真空断路器故障	牵引丢失	4.20	偶尔发生	C	不希望	主断路器解锁复位
	13	BN1 电路断路器断开	真空短路器故障	牵引丢失	0.76	很少发生	C	容忍的	
牵引电机通风机	14	牵引电机风扇接通状态异常	牵引系统故障	牵引丢失	4.96	偶尔发生	B	不希望	复位
变流器冷却单元	15	冷却循环故障	冷却液压力为负值	一个牵引单元失效	2.10	偶尔发生	C	不希望	清洗冷却系统滤网
牵引电机	16	牵引电机温度超限	牵引电机温度传感器故障	牵引功率降低	10.02	很可能发生	B	不希望	更换温度传感器

馈结果表明,上述措施保证了牵引供电系统的运行可靠性。

4 结束语

基于 FMECA 方法,综合分析了某动车组牵引供电系统的故障模式、故障原因、故障影响、故障发生频率以及严重度,并对其危害度进行定性分析,得出本系统危险故障源包括:IGBT 模块监控不起作用、变压器油泵 34-F55 跳开、制冷风扇故障和变压器油流故障等。该方法从故障发生概率及其危害程度两个维度全面判断故障对系统的综合影响程度,

通过系统危害矩阵对危害度高的故障制定相应的预防或纠正措施,从而实现牵引供电系统的可靠运行。该方法对动车其他子系统的故障研究提供了技术支持。

参 考 文 献

- [1] 张小瑜,吴俊勇.高速铁路牵引供电系统的供电可靠性评估方法[J].电网技术,2007,31(11):27-32.
Zhang Xiaoyu, Wu Junyong. Reliability estimation method of traction power supply system for high-speed railway[J]. Power System Technology, 2007,31(11):

- 27-32. (in Chinese)
- [2] 林飞, 罗军, 李志锋. 2003, 2004 年全国电力牵引供电系统故障统计分析[J]. 工业科技, 2006, 35(3): 27-28.
Lin Fei, Luo Jun, Li Zhifeng. Power system failures analyzed by the national statistical of electric traction in 2003 and 2004 [J]. Industrial Technology, 2006, 35(3): 27-28. (in Chinese)
- [3] 胡海涛, 高朝晖, 何正友, 等. 基于 FTA 和 FMEA 法的地铁牵引供电系统可靠性评估[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 48-54.
Hu Haitao, Gao Chaohui, He Zhengyou, et al. Reliability evaluation of metro traction power supply system based on FTA and FMEA methods[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 48-54. (in Chinese)
- [4] 钟永发. 提高铁路客运专线牵引供电系统可靠性的探讨[J]. 电气化铁道, 2012(6): 25-28.
Zhong Yongfa. Improve the reliability of the traction power supply of the high-speed railway passenger dedicated line[J]. Electric Railway, 2012(6): 25-28. (in Chinese)
- [5] Stamatis D H. FMEA 从理论到实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 105-119.
- [6] 董锡明. 轨道列车可靠性、可用性、维修性和安全性 (RAMS) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009: 37-45.
- [7] Relx Software Company & Intellect. Reliability: a practitioner's guide [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 11-14.
- [8] 华鹏. 基于运用维护的高速列车安全评估研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- [9] 王奔. FRACAS 与 FMECA 在铁路货车产品中的应用研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
- [10] Lu Bihong, Wang Ben, Li Yonghua, et al. FRACAS design for railway freight cars[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Piscataway: IEEE Computer Society, 2011: 1104-1108.
- [11] 卢碧红. 现代质量工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 97-100.



第一作者简介: 卢碧红, 女, 1961 年 11 月生, 博士、教授。主要研究方向为轨道交通装备质量与 RAMS 工程。曾发表《虚拟数控车削加工精度预测研究》(《机械工程学报》2002 年第 38 卷第 2 期) 等论文。

E-mail: bhl@djtu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管, 南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办, 是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献, 包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等, 不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊, 双月刊, 每逢双月末出版, 每本定价 20 元, 全年 120 元。欢迎订阅和投稿, 欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址: 南京市御道街 29 号 邮政编码: 210016

电话: (025) 84893332

传真: (025) 84893332 E-mail: qchen@nuaa.edu.cn

网址: <http://zdc.nuaa.edu.cn>