

“能量高效利用与管理”专栏

城市轨道交通双向变流器供电系统可靠性预计研究

陈洁莲¹, 李素芬², 王 雄¹, 胡晓东², 武 彬²

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 为了提升城市轨道交通双向变流供电技术应用的可靠性和安全性, 文章基于双向变流器的功能逻辑和任务要求, 针对无冗余结构、“1+1”冗余结构和“4+2”冗余结构这 3 种设计方案分别建立可靠性评估模型, 并结合相似产品法进行了基本可靠性和任务可靠性预计。结果显示, 3 种方案中两套双向变流机组并联使用方案的可靠性综合指标最佳, 基本可靠度对应的失效率为 5.24×10^{-5} , 任务可靠度在 20 000 h 时为 0.989 3。基于可靠性预计结果, 文章针对最优方案中的薄弱环节提出了可靠性提升方案, 预计可将 20 000 h 时的任务可靠度从目前的 0.989 3 提升至 0.999 3。

关键词: 城市轨道交通供电系统; 双向变流器; 可靠性预计; 平均故障间隔时间

中图分类号: N945.17

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)03-0033-08

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.03.006

Reliability Prediction of Bi-directional Converter Power Supply System for Urban Rail Transit

CHEN Jieliang¹, LI Sufen², WANG Xiong¹, HU Xiaodong², WU Bin²

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

2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to improve the application reliability and safety of urban rail bi-directional converter power supply technology, it is necessary to carry out forward quality design, and to model, analyze and compare the reliability of different design schemes. Based on the function logic and task requirements of bi-directional converter, this paper establishes reliability evaluation models for three schemes including the non-redundant structure, the "1+1" redundant structure and the "4+2" redundant structure, respectively. It further forecasts the basic reliability and task reliability combined with the similar product method. The predicted results show that the comprehensive reliability index of the scheme with two sets of bi-directional converter units in parallel is the best. The failure rate of basic reliability is 5.24×10^{-5} , and the mission reliability is 0.989 3 at 20 000 h. Finally, based on the reliability prediction results, this paper proposes a reliability improvement scheme for the weak links in the optimal scheme, which is expected to improve the mission reliability at 20 000 h from 0.989 3 to 0.999 3.

Keywords: urban rail power supply system; bidirectional converter; reliability prediction; mean time between failures

0 引言

随着我国城市轨道交通行业的快速发展, 城市

轨道交通供电技术也在不断创新。第一代城市轨道交通供电系统采用二极管整流加制动电阻耗能技术, 但该技术会造成大量能源浪费。第二代供电系统采用二极管整流加再生制动能量回馈技术, 但其二极管整流机组的不可控整流会造成牵引网压波动, 不利于列车平稳运行。为进一步提高直流牵引网压的稳定性, 改善非高峰时段功率因数, 可采用双向变流供电系统

收稿日期: 2020-11-24

作者简介: 陈洁莲(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向为牵引供电系统。

基金项目: 系列化中国标准地铁列车研制与试验

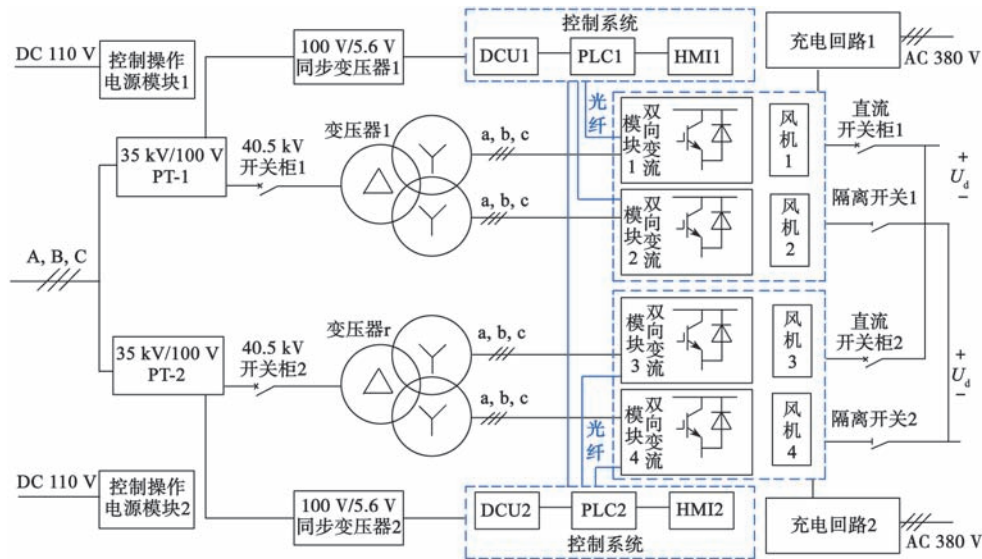


图 2 方案二的结构组成图

Fig. 2 Structure composition diagram of the scheme 2

(3) 方案三

该方案的系统包括一个开关柜、一个 4 路输出的变压器,以及 4 路并联的 IGBT 双向变流机组;为“4+2”冗余结构(图 3)。若其中一路出现故障(开关柜、变压器、控制系统等未发生故障,任意支路的双向变流模块/风机故障),切换为 3 路工作状态;若其中两路出现故障(开关柜、变压器等未故障,任一控制系统故障,或者任意两路中的双向变流模块/风机发生故障),则切换到两路工作状态。系统至少需有两路双向变流机组正常工作,才可满足系统功率需求。

1.2 系统任务剖面、故障判据与工作条件

双向变流供电系统的任务剖面如图 4 所示。

城市轨道交通列车正常发车启动及运行时,双向变流装置为直流牵引网供电;制动时,列车的动能被转换为电能,从而抬升直流牵引网电压。一旦双向变流装置检测到直流牵引网电压抬升到特定值,就启动回馈功能,将制动能量回馈至 35 kV 交流电网。

该系统在有效寿命周期内与系统设计、制造有关的故障均被记为影响基本可靠度性的关联故障;凡由于双向变流供电系统设计、制造缺陷而造成的不能完成规定任务或者影响人员安全的故障,即被视为影响任务和安全的关联故障^[10-11]。

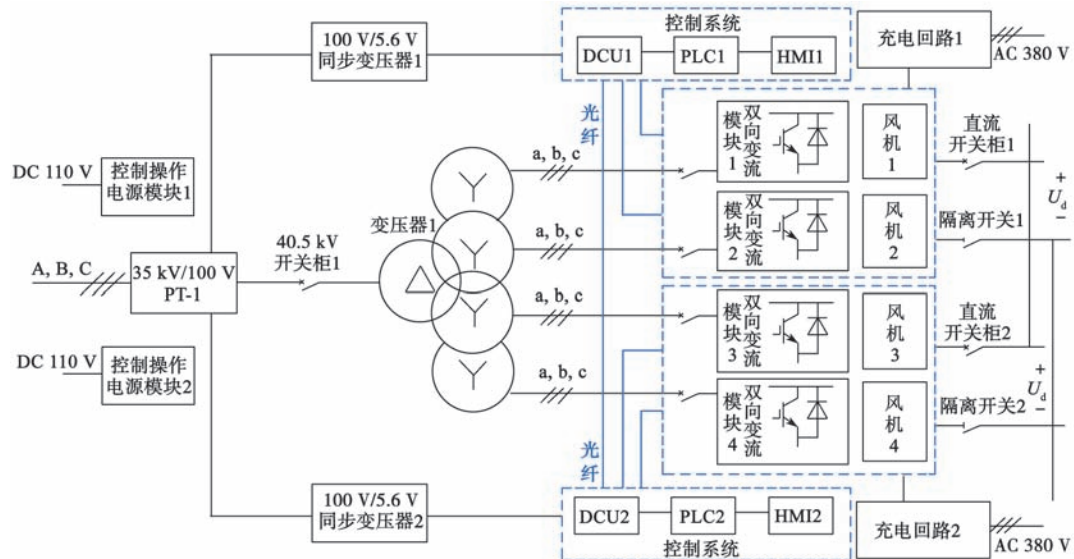


图 3 方案三的结构组成图

Fig. 3 Structure composition diagram of the scheme 3

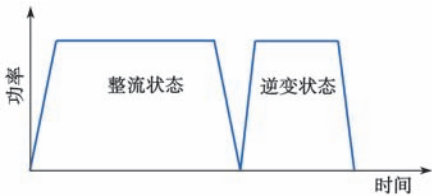


图 4 系统任务剖面
Fig. 4 System mission profile

该系统被置于室内，通风良好；环境温度范围为 $-10\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；日均湿度不大于 95%，月均湿度不大于 90%（ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），有凝露现象发生。

2 双向变流供电系统可靠性建模

可靠性框图是基于支配系统运行的物理规律、根据系统组成单元之间功能相关性而建立的可靠性模型，其可用于描述单元功能与系统功能之间的逻辑关系，并考虑不同部件故障对整个系统性能的影响。

2.1 可靠性建模基本假设

针对双向变流供电系统建立可靠性模型的 3 个假设前提如下：

（1）系统输入是可靠的，各组成单元间电气连接（如导线、连接器）是可靠的，且产品可靠性不受装卸、运输等影响。

（2）产品早期故障经产品质量控制和环境应力筛选已被剔除，产品进入浴盆曲线偶然故障阶段，故障率较低且近似为常数。

（3）系统中各部分的寿命都服从指数分布，各组成部分之间的故障相互独立；各个组成部分只有正常态或者失效态；不考虑因耗损引起性能降低的情况。

2.2 基本可靠性建模

基本可靠性框图是系统各单元串联组成的模型，用以估计系统及其组成部件故障所引起的维修及保障要求。3 种方案的基本可靠性框图分别如图 5~ 图 7 所示。

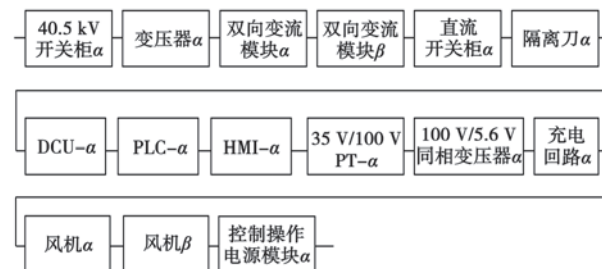


图 5 方案一的基本可靠性框图
Fig. 5 Basic reliability block diagram of the scheme 1

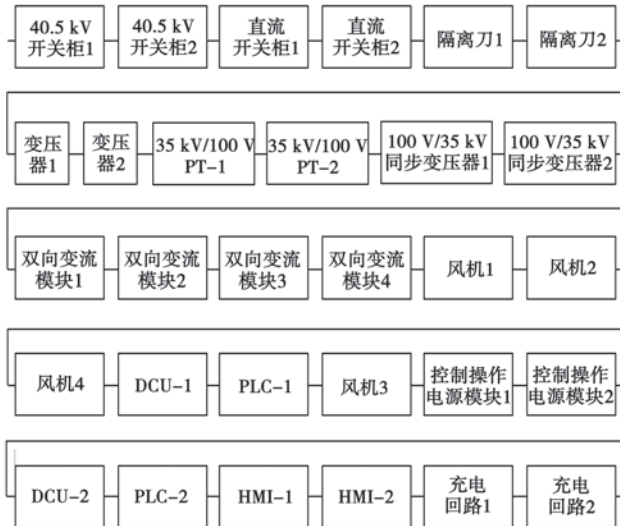


图 6 方案二的基本可靠性框图
Fig. 6 Basic reliability block diagram of the scheme 2

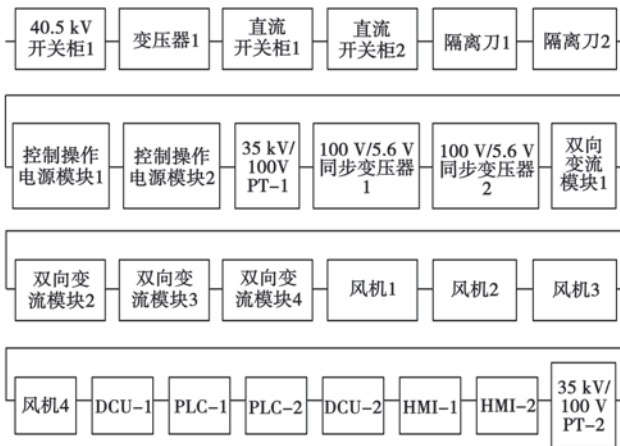


图 7 方案三的基本可靠性框图
Fig. 7 Basic reliability block diagram of the scheme 3

2.3 任务可靠性建模

任务可靠性模型是一种用于度量系统在执行任务过程中完成功能的概率、描述完成任务过程中系统各单元的预定作用并度量工作有效性的可靠性模型。3 种方案的任务可靠性框图分别如图 8~ 图 10 所示。

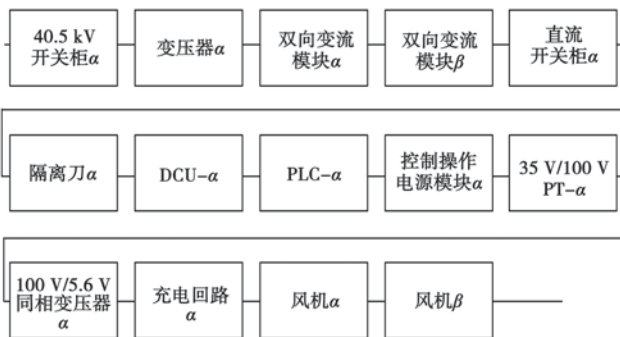


图 8 方案一的任务可靠性框图
Fig. 8 Mission reliability block diagram of the scheme 1

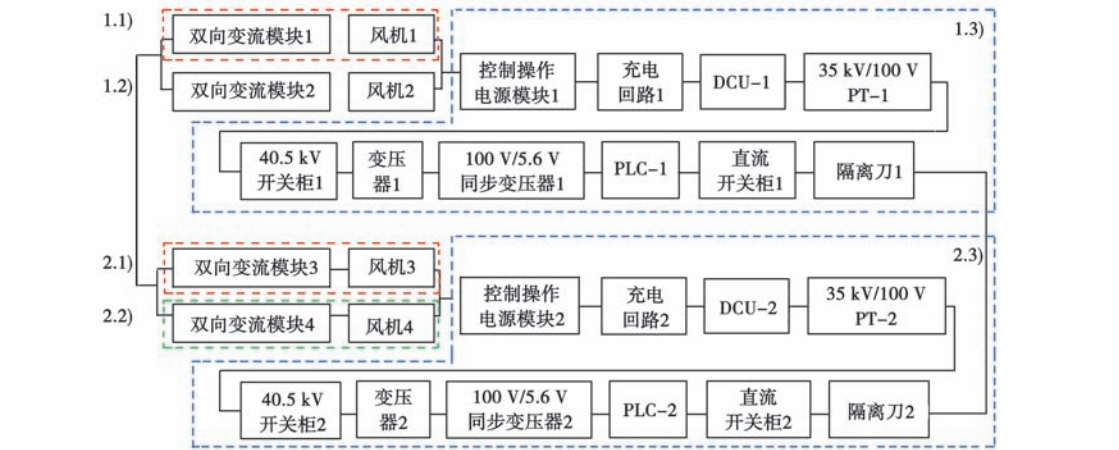


图 9 方案二的任务可靠性框图
Fig. 9 Mission reliability block diagram of the scheme 2

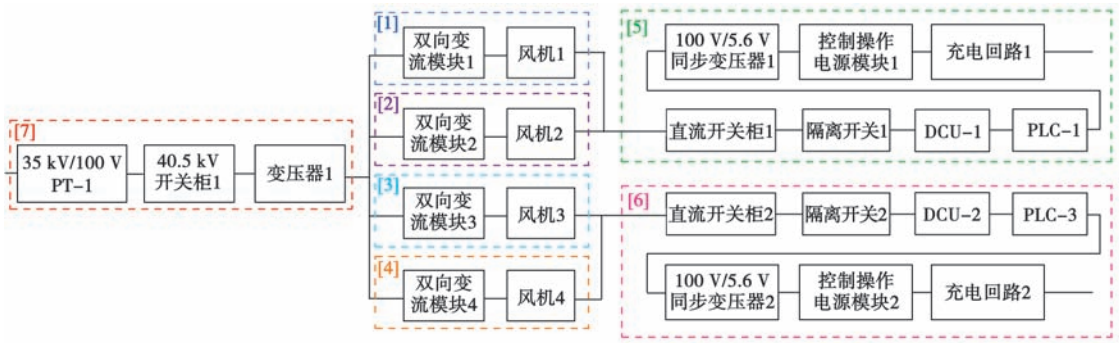


图 10 方案三的任务可靠性框图
Fig. 10 Mission reliability block diagram of the scheme 3

3 双向变流供电系统可靠性预计

为量化分析不同设计方案的可靠性，本文将对 3 种设计方案进行可靠性预计分析^[12]。通过相似产品得到子部件故障率，以及不同设计方案的基本可靠性和任务可靠性预计过程。

3.1 子单元可靠性预计方法

系统中子单元的故障率采用相似产品法预计得到。通过历史故障数据统计以及物料手册等得到旧式相似产品子单元的故障率为 $\lambda_{i旧}$ ，则新研发产品中同一子单元的 $\lambda_{i新}=\lambda_{i旧} \times C_i$ ，其中， C_i 是新研发产品各子单元的故障率差异评分系数。评分数由系统人员、产品设计人员及物料工程师等基于以下几个方面打得出：

- (1) 产品结构及性能的复杂程度；
- (2) 设计的相似性；
- (3) 产品物料、制造工艺的相似性；
- (4) 使用剖面的相似性。

3.1.1 所引用相似产品的现场可靠性统计数据

采用两电平双向变流系统作为相似产品。其中，

外购件的故障率通过查询技术规格书、产品手册等得到，自研发产品的故障率通过历史故障数据统计计算得到，不包括产品在调试阶段的故障数据。

3.1.2 双向变流装置子单元可靠性预计

采用相似产品法进行可靠性预计时，比较目标单元与已有相似单元之间的差异，选择适当的差异性系数对现场失效率进行调整，考虑功能结构、工作条件/环境条件等方面的差异后，得到调整后的目标单元预计失效率^[13]。

3.2 系统基本可靠性预计

基于系统和子部件服从指数分布的前提假设，子部件的可靠性与其失效率存在指数函数关系。根据串联模型特点，系统内任一子部件发生失效，系统基本可靠性会降低，则系统的可靠性为各子部件可靠性的乘积。3 种方案的基本可靠性预计如下：

(1) 方案一

$$R_{x1}(t) = \prod_{i=1}^{15} R_i = \prod_{i=1}^{15} \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{15} \lambda_i t\right) \quad (1)$$

$$\lambda_{x1} = \sum_{i=1}^{15} \lambda_i t = 2.54 \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中: R_{x1} ——方案一的基本可靠度; λ_{x1} ——方案一的基本系统失效率; R_i ——第 i 个子部件的可靠度; λ_i ——第 i 个子部件的失效率。

(2) 方案二

$$R_{x2}(t) = \prod_{i=1}^{30} R_i = \prod_{i=1}^{30} \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{30} \lambda_i t\right) \quad (3)$$

$$\lambda_{x2} = \sum_{i=1}^{30} \lambda_i t = 5.42 \times 10^{-5} \quad (4)$$

式中: R_{x2} ——方案二的基本可靠度; λ_{x2} ——方案二的基本系统失效率。

(3) 方案三

$$R_{x3}(t) = \prod_{i=1}^{26} R_i = \prod_{i=1}^{26} \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{26} \lambda_i t\right) \quad (5)$$

$$\lambda_{x3} = \sum_{i=1}^{26} \lambda_i t = 4.87 \times 10^{-5} \quad (6)$$

式中: R_{x3} ——方案三的基本可靠度; λ_{x3} ——方案三的基本系统失效率。

3.3 系统任务可靠性预计

为量化比较不同方案成功执行任务的概率,下面将基于 2.3 节所建立的系统任务可靠性模型进行任务可靠性预计。

3.3.1 方案一

假设系统和子部件寿命都服从指数分布,则系统的任务可靠度为

$$R_{s1}(t) = \prod_{i=1}^{15} R_i \quad (7)$$

$$\lambda_{s1} = \sum_{i=1}^{15} \lambda_i t = 7.43 \times 10^{-5} \quad (8)$$

$$R_{s1} = e^{-\lambda_{s1} t} \quad (9)$$

式中: R_{s1} ——方案一的任务可靠度; λ_{s1} ——方案一的基本系统任务失效率。

3.3.2 方案二

根据方案二系统的功能逻辑和系统工作模式,其任务可靠性分 2 种情况讨论:

(1) 图 9 中支路 1.3) 与支路 2.3) 一条正常、一条故障,则简化模型如图 11 所示。

此时方案二任务可靠性计算模型可被简化为

$$\left. \begin{aligned} P_{21} &= 2(1 - R_{1.3}) R_{1.3} R_{1.1} R_{1.2} \\ R_{1.3} &= \prod_{i=1}^{10} R_i \lambda_{1.3} = \sum_{i=1}^{10} \lambda_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: P_{21} ——方案二第一种情况的任务可靠度; $R_{1.17}, R_{1.27}, R_{1.3}$ ——方案二中支路 1.1)、支路 1.2)、支路 1.3) 的任务可靠度。

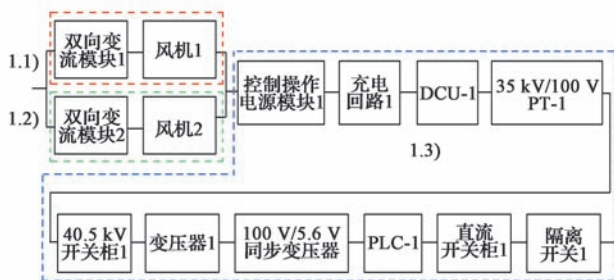


图 11 方案二任务可靠性第一种情况

Fig. 11 The first case of the scheme 2 task reliability

(2) 图 9 所示中支路 1.3) 和支路 1.4) 两条皆正常,则简化模型如图 12 所示。

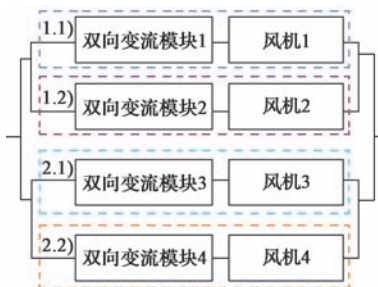


图 12 方案二任务可靠性第二种情况

Fig. 12 The second case of the scheme 2 task reliability

此时方案二任务可靠性计算模型可被简化为

$$\left. \begin{aligned} P_{22} &= R_{1.3} \times R_{1.3} \sum_{x=2}^4 P(x) \\ P(2) &= \frac{4!}{2!(4-2)!} R_{1.1} t^2 (1 - R_{1.1}) t^2 \\ P(3) &= \frac{4!}{3!(4-3)!} R_{1.1} t^3 (1 - R_{1.1}) t^1 \\ P(4) &= \frac{4!}{4!(4-4)!} R_{1.1} t^4 (1 - R_{1.1}) t^0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: P_{22} ——方案中二第二种情况的任务可靠度; $P(2)$ ——4 条支路即支路 1.1)、支路 1.2)、支路 2.1) 及支路 2.2) 中有两条正常工作时的任务可靠度; $P(3)$ ——4 条支路中有 3 条正常工作时的任务可靠度; $P(4)$ ——4 条支路全正常工作时的任务可靠度。

3.3.3 方案三

根据方案三系统的功能逻辑和系统工作模式,其任务可靠性分两种情况讨论:

(1) 图 10 中支路 [5] 和支路 [6] 中一路正常、一路故障。记这情况的概率为 P_{31} , 则简化模型如图 13 所示。

由于方案三中要求至少有两个支路能够正常工作,因此方案三第一种情况的任务可靠度:

$$P_{31} = 2 \times (1 - R_{[5]}) R_{[5]} R_{[7]} R_{[1]} R_{[2]} \quad (12)$$

图 10 中支路 [5] 和支路 [6] 皆正常。记这情况的概率为 P_{32} , 则简化模型如图 14 所示。

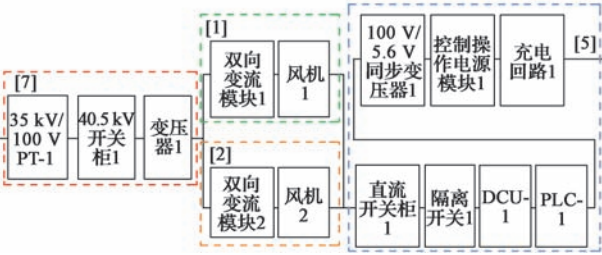


图 13 方案三任务可靠性第一种情况
Fig. 13 The first case of the scheme 3 task reliability

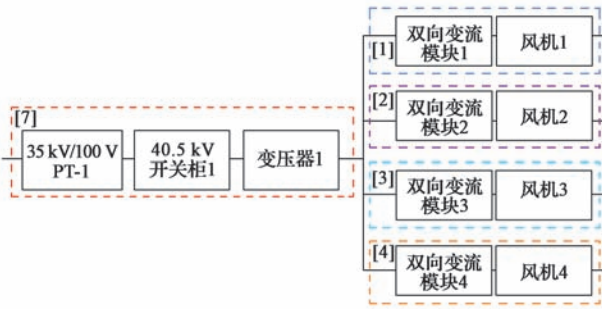


图 14 方案三任务可靠性第二种情况
Fig. 14 The second case of the scheme 3 task reliability

方案三中至少有两个支路能够正常工作，因此这种情况的概率为

$$P_{32} = R_{[5]}^2 R_{[7]} \sum_2^4 P(x)$$

(13)

则此时方案三的任务可靠度为

$$R_{s3}(t) = 2(1 - R_{[5]}) R_{[5]} P_1(t) + R_{[5]}^2 R_{[7]} \sum_4^2 P(x)$$

(14)

其中支路 [1], [2], [3], [4] 中有 2、3、4 条支路能正常工作的概率如下：

$$P(2) = \frac{4!}{2!(4-2)!} R_{[1]}^2 (1 - R_{[1]})^2$$

(15)

$$P(3) = \frac{4!}{3!(4-3)!} R_{[1]}^3 (1 - R_{[1]})^1$$

(16)

$$P(4) = \frac{4!}{4!(4-4)!} R_{[1]}^4 (1 - R_{[1]})^0$$

(17)

4 可靠性预计结果分析

由 3.2 节和 3.3 节计算得到了各方案的基本可靠性和任务可靠性预计结果，本节进行不同设计方案的比较分析，并针对系统中薄弱环节提出系统可靠性提升方案。

4.1 设计方案评估分析

4.1.1 基本可靠性

各方案基本可靠性如表 1 所示，其中 MTBF 是指平均故障间隔时间。

表 1 各方案基本可靠性比较
Tab. 1 Comparison of basic reliability of each solution

方案	基本可靠度对应的失效率	MTBF/h
方案一	2.54×10^{-5}	3.94×10^4
方案二	5.24×10^{-5}	1.91×10^4
方案三	4.87×10^{-5}	2.05×10^4

从表 1 可以看出，由于方案一无冗余结构，其子部件数量最少，因此方案一基本可靠度对应的失效率最低；而方案二基本可靠度对应的失效率比方案三的略高，主要因为方案二系统器件数量较多。

4.1.2 任务可靠性

各方案任务可靠性比较如表 2 所示。

表 2 各方案任务可靠性比较
Tab. 2 Comparison of mission reliability of each solution

方案	任务可靠度 (20 000 h)	MTBF/h
方案一	0.778 8	1.87×10^5
方案二	0.989 3	2.07×10^5
方案三	0.980 1	1.73×10^5

从表 2 可以看出，由于方案一只有一台装置，系统无冗余设计，因此其任务可靠度较低；方案二任务可靠度比方案三略高，主要因为方案二冗余度更高。

最后，综合 3 种设计方案的基本可靠性和任务可靠性的指标评估结果可以看出，方案二的可靠性指标更优。

4.2 系统可靠性提升方案

结合子单元故障率、系统基本可靠性和系统任务可靠性预计结果可知，DCU、变流模块、控制电源、HMI 是双向变流装置的薄弱环节。为提升系统可靠性，须针对各器件失效特点，采取差异化可靠性提升措施。

4.2.1 低可靠性器件 / 物料可靠性提升

由产品应用历史故障数据可知，DCU 和功率模块的薄弱环节均位于电源板。其中，电路板级电源模块和电路板级继电器是 DCU 的薄弱环节；而电路板级电源模块是功率模块的薄弱环节，其失效原因是电源板对潮湿、多灰尘的应用环境的适应性欠佳。因此，可针对可靠性较低的电源板采取以下措施：（1）加强三防涂覆工艺；（2）加强工艺物料 / 产品的早期老化筛选；（3）开展环境适应性试验，暴露并改进薄弱环节。通过采取这些措施，DCU 失效率从 10×10^{-7} 数量级降低至 10×10^{-8} 数量级，使

功率模块的失效率从 10×10^{-6} 数量级降低至 10×10^{-7} 数量级。

4.2.2 低可靠性器件 / 物料冗余设计

虽然双向变流器中的二次电源来自蓄电池, 其供电可靠性和稳定性非常高; 但二次电源链路中还包括用于操作、控制供电的电源模块, 其失效率较高, 而操作、控制电源模块的失效亦将造成系统无法正常完成任务。因这些器件本身可靠性提升空间不大, 可采用冗余设计, 以提高装置任务可靠性。

4.2.3 低可靠性器件 / 物料替代设计

HMI 作为双向变流装置的人机交互界面, 由于其环境适应性较差, 目前应用中的故障率较高。虽然 HMI 失效通常不影响装置任务可靠性, 但不利于客户的良好体验。因此, 可以考虑采用智能运维系统, 通过云平台存储运行数据, 从而通过手机 APP 取代目前的 HMI 装置。

综上, 将影响系统可靠性的关键部件通过专项质量提升、冗余设计、替代设计等方案进行优化, 方案二装置的任务可靠度有较大提高, 系统在 20 000 h 的任务可靠度 $R(20\ 000\ h)$ 将从目前的 0.989 3 提升至 0.999 3, 与目前应用的城市轨道交通供电系统的可靠度基本相当。

5 结语

本文对城市轨道交通双向变流供电系统不同冗余方案的可靠性进行了分析与研究, 针对装置的任务和结构组成的逻辑特点, 分别建立了基本可靠性和任务可靠性模型。通过相似产品法得出模型中各子部件的失效率。经计算与比较, 选出了可靠性最优的方案, 其任务可靠度在 20 000 h 时可达 0.989 3。最后还提出了改善系统可靠性的措施, 系统的 $R(20\ 000\ h)$ 将从目前的 0.989 3 提升至 0.999 3。

在本次研究中并未考虑系统组成中材料、器件等的分散性。后续将累计子单元故障数据, 细化建模颗粒度, 并采用建模仿真的方法来研究材料、器件等的分散性的可靠性预计方法。

参考文献:

- [1] 张铁军, 陈雪, 陈广赞, 等. 城轨供电系统新型再生制动能量回馈系统 [J]. 大功率变流技术, 2011(5): 37-40.
ZHANG T J, CHEN X, CHEN G Z, et al. A Novel Regeneration Braking Power Feedback Set for MRT Power System [J]. High Power Converter Technology, 2011(5): 37-40.
- [2] 郭洪斌. 双向变流器在城市轨道交通中的应用浅析 [J]. 科学与信息化, 2019(3):168.
- [3] 杨树松, 李辉, 朱纪法. 双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 194-197.
YANG S S, LI H, ZHU J F. Functional Verification of Bidirectional Converter Applied in Urban Rail Transit Power Supply System[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1):194-197.
- [4] 李乃坚. 基于变流器的能量回馈装置设计实现 [J]. 智能城市应用, 2019, 2(7): 47-51.
- [5] CHEN Z C, HUAN Q I, WEI J, et al. Research on reliability modeling based on reliability block diagram[J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(6): 407-411.
- [6] 蓝德劭, 李新雷, 王鑫, 等. 一种具有功率融通功能的高压动态无功补偿装置 [J]. 大功率变流技术, 2016(3): 21-26.
LAN D S, LI X L, WANG X, et al. A High-voltage Dynamic Var Compensation Device with Active Power Transfer Function[J]. High Power Converter Technology, 2016(3): 21-26.
- [7] 杨波. 城市轨道交通再生制动能量反馈技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [8] 张骄, 李宇杰, 王昊, 等. 城市轨道交通供电系统新技术研究 [J]. 机械制造, 2020, 58(2): 51-53,85.
- [9] 徐良, 韩民晓. 电网电压不对称工况下微网的低电压穿越控制策略 [J]. 大功率变流技术, 2016(3):36-39.
XU L, HAN M X. Control Strategy of Low-voltage Ride-through for Micro-grid under Asymmetric Grid Voltage[J]. High Power Converter Technology, 2016(3): 36-39.
- [10] 吴迪, 黄敬. 基于可靠性框图的舰船电力系统可靠性建模 [J]. 船电技术, 2019(增刊 1): 28-31.
WU D, HUANG J. Reliability Modeling for Shipboard Power System Based on Reliability Block Diagram[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019(s1): 28-31.
- [11] ZHAO G Y, RUI K, SUN Y F, et al. System Fault Behavior Model Considering the Effects of Structural Factors and Method of Its Description[C]// Third International Conference on Dependability. Venice, Italy: IEEE, 2010.
- [12] 陈志亮. 浅谈电力系统供电可靠性 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2014 (34): 3707.
- [13] 王军波, 李彦学. 相似产品法在某子母弹子弹引信可靠贮存寿命预计中的应用 [J]. 制导与引信, 1995 (3): 23-26.