

基于故障树分析法的地铁主变电所可靠性量化与评估

祝 唯 黄山山

(广州地铁集团有限公司, 510030, 广州//第一作者, 工程师)

摘 要 地铁主变电所的安全可靠直接影响地铁供电系统的稳定运行,其可靠性量化与评估研究对衡量、评价当前供电系统的运行模式至关重要。针对地铁主变电所系统结构及运行方式,结合各层级关键设备基础数据,以故障树分析法构建主变电所故障树模型,并分别计算此故障树的最小割集及最小径集集合;计算并评估划分关键设备对主所级系统的概率重要度,进而计算出顶层事件(主变电所退出)的失效概率。可为地铁供电系统整体可靠性的量化分析与评估奠定基础,并为运营维护决策提供依据。

关键词 地铁供电;主变电所;故障树分析;可靠性评估

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.021

Reliability Quantification and Assessment of Subway Substation Based on FTA Method

ZHU Wei HUANG Shanshan

Abstract Safety and reliability of the main subway substation directly affect the stable operation of power supply system, and the reliability quantification and assessment is very important in measuring and evaluating the operating conditions of the current power supply system. Aiming at the system structure and operation mode of the main subway substation, and combined with the basic data of key equipment at all levels, a fault tree model of the main substation is constructed based on FTA analysis, which is used to calculate the minimal cut set and the minimum path set of the fault tree respectively, and to assess the probabilistic importance of key equipment for the main substation system, and then is used to calculate the failure probability of the top event. This research will lay a foundation for the overall reliability quantification, system evaluation and maintenance decision of subway power supply system.

Key words subway power supply; main transformer substation; FTA (fault tree analysis); reliability assessment

Author's address Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510030, Guangzhou, China

地铁运营的可靠性及安全性要求越来越高。在地铁供电系统中,主变电所是维持地铁运行的电

能源泉,其稳定运行至关重要。

主变电所的可靠性由内部各个子系统关键设备的稳定程度来构建。在规定条件及一定时间内,主变电所可完成相应功能的完好能力,直接影响地铁运营的可靠性。主变电所的功能结构及运行方式存在着较为繁琐的关联关系,其子系统间的串、并联关系也较为复杂。因此,主变电所的可靠性量化与评估分析存在困难。具体而言,一方面,设备故障的运营数据不全。无论采取哪种方法进行研究分析,都不能离开运营基础信息的数据支撑。数据信息的全面程度、质量好坏也与后续理论研究、分析方法息息相关。另一方面,地铁主变电所由至少含 2 种及以上的电压等级设备并以串、并联的组合方式构成,难以对其进行系统建模,以致其可靠性分析结构基础不足。

为此,本文笔者进行了广泛调研。调研结果表明,设备可靠性的有效分析可以故障模式后果分析(FMEA)法^[1-2]及故障树分析(FTA)法^[3]为主。FMEA及FTA在铁路供电系统、电力电网系统、综合自动化系统、通信系统等专业应用广泛^[4-9]。在城市轨道交通领域,基于FMEA及FTA,文献[10]对地铁接触网系统的失效事件进行了可靠性分析,文献[11]对地铁牵引变电所构建可靠性模型进行了失效分析。目前,针对地铁主变电所整体的可靠性评估相对较少。

本文采取FTA法,根据某地铁线路积累的基础信息数据,划分主变电所各电压等级,确定关键设备的层次结构,结合已定义的顶层失效事件,对其主变电所进行可靠性量化分析与评估,可为地铁运营维护管理提供有效、可行的辅助决策。

1 地铁主变电所系统

目前,地铁主变电所接入主要采取 2 个独立的 110 kV 三相交流电源供给。广州地铁某主变电所运行结构图如图 1 所示。

3 案例应用

结合主变电所的运行结构,定义其顶事件的失效情况为所有 33 kV 馈线开关柜失电,即相当于主变电所整体退出运行。其故障树如图 2 所示。

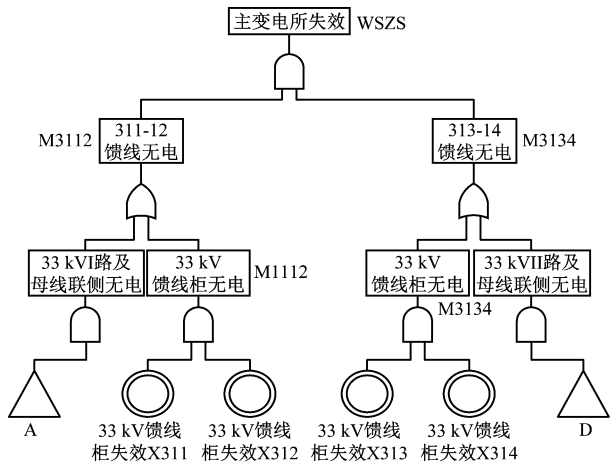


图 2 主变电所故障树结构图

图 2 中,顶层事件为主变电所失效(事件名称:WSZS),中间事件分别为 311、312、313、314 馈线柜无电(事件名称:M3112、M3134),底事件为 33 kV 馈线柜失效(事件名称:X311、X312、X313、X314)。由于主变电所结构为对称布局,故 33 kV 的 I 路及母线联侧无电(事件名称:A)与 33 kV 的 II 路及母线联侧无电(事件名称:D)为对称结构。事件 A 的下行结构故障树见图 3。

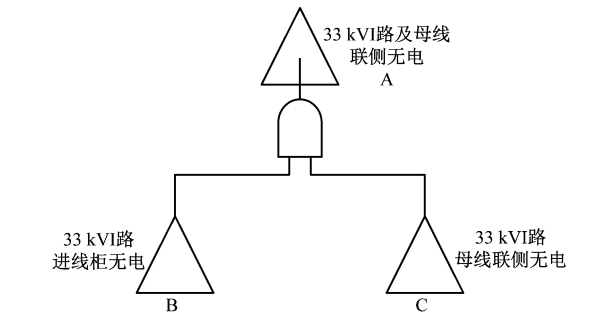


图 3 事件 A 的故障树结构图

图 3 中,33 kV 的 I 路进线柜无电(事件名称:B),33 kV I 路母线联侧无电(事件名称:C)。B 及 C 以与门结构构成 A 事件。B 事件故障树结构图见图 4。C 事件故障树结构图见图 5。D 事件与 A 事件为对称结构,这里不再赘述。

设备事件的运营数据中,存在未发生失效事件的设备。故障树基本事件的定义及事件概率如表 1

所示。

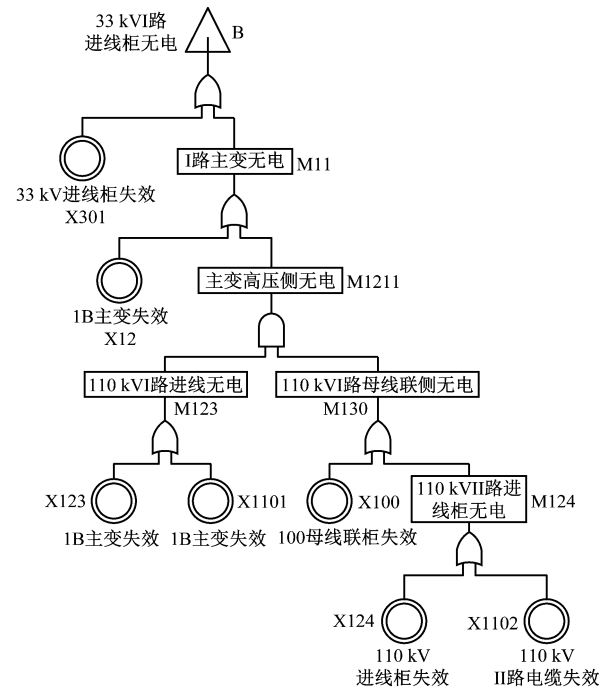


图 4 事件 B 故障树结构图

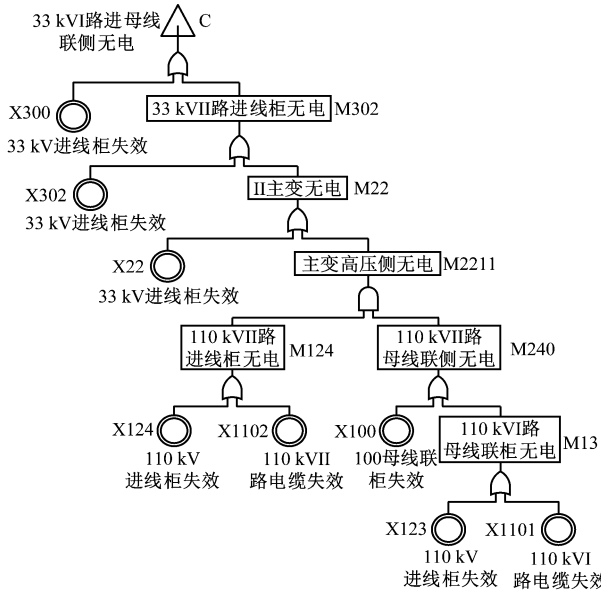


图 5 事件 C 故障树结构图

采取下行法^[12-14](Fussell-Vesely 算法)求解,得到故障树的最小割集集合为: $\{X_{100}, X_{123}, X_{300}, X_{313}, X_{314}\}, \{X_{100}, X_{123}, X_{302}\}, \{X_{100}, X_{124}, X_{300}, X_{311}, X_{312}\}, \{X_{100}, X_{124}, X_{301}\}, \{X_{100}, X_{300}, X_{311}, X_{312}, X_{1102}\}, \{X_{100}, X_{300}, X_{313}, X_{314}, X_{1101}\}, \{X_{100}, X_{301}, X_{1102}\}, \{X_{100}, X_{302}, X_{1101}\}, \{X_{1101}, X_{1102}\}, \{X_{12}, X_{100}, X_{1102}\}, \{X_{12}, X_{100}, X_{124}\}, \{X_{12}, X_{22}\}, \{X_{12}, X_{300}, X_{313}, X_{314}\}, \{X_{12}, X_{302}\},$

$$\{X_{123}, X_{1102}\}, \{X_{123}, X_{124}\}, \{X_{124}, X_{1101}\}, \{X_{22}, X_{100}, X_{1101}\}, \{X_{22}, X_{100}, X_{123}\}, \{X_{22}, X_{300}, X_{311}, X_{312}\}, \{X_{22}, X_{301}\}, \{X_{300}, X_{301}, X_{313}, X_{314}\}, \{X_{300}, X_{302}, X_{311}, X_{312}\}, \{X_{301}, X_{302}\}, \{X_{311}, X_{312}, X_{313}, X_{314}\}。$$

表 1 基本事件定义及事件概率

事件编号	事件名称	事件概率
X_{311}	33 kV 馈线柜失效	0.021 600
X_{301}	33 kV 进线柜失效	0.021 600
X_{12}	1B 主变失效	0.001 000
X_{123}	110 kV 进线柜失效	0.016 806
X_{1101}	110 kVI 路电缆失效	0.032 000
X_{100}	100 母线联柜失效	0.016 806
X_{124}	110 kV 进线柜失效	0.016 806
X_{1102}	110 kVII 路电缆失效	0.032 000
X_{300}	300 母线联柜失效	0.021 600
X_{302}	33 kV 进线柜失效	0.021 600
X_{22}	2B 主变失效	0.001 000
X_{312}	33 kV 馈线柜失效	0.021 600
X_{313}	33 kV 馈线柜失效	0.021 600
X_{314}	33 kV 馈线柜失效	0.021 600

将故障树的发生事件以其相反故障不发生事件代替,并将事件间逻辑“与门”同“或门”相互置换,进一步将故障树变换为对偶的成功树^[15],从而可求出该成功树的最小割集集合。根据对偶原理,其最小割集集合即为原故障树的最小径集集合,即: $\{X_{12}, X_{100}, X_{124}, X_{300}, X_{301}, X_{313}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{100}, X_{124}, X_{300}, X_{301}, X_{314}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{100}, X_{124}, X_{301}, X_{311}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{100}, X_{124}, X_{301}, X_{312}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{123}, X_{300}, X_{301}, X_{313}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{123}, X_{300}, X_{301}, X_{314}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{123}, X_{301}, X_{311}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{12}, X_{123}, X_{301}, X_{312}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{100}, X_{123}, X_{300}, X_{302}, X_{311}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{100}, X_{123}, X_{300}, X_{302}, X_{312}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{100}, X_{123}, X_{302}, X_{313}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{100}, X_{123}, X_{302}, X_{314}, X_{1101}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{124}, X_{300}, X_{302}, X_{311}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{124}, X_{300}, X_{302}, X_{312}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{124}, X_{302}, X_{313}, X_{1102}\}$ 、 $\{X_{22}, X_{124}, X_{302}, X_{314}, X_{1102}\}。$

根据分析结果,在主变电所故障树中,电缆、33 kV 进线柜、110 kV 进线柜及主变电站对地铁牵引供电系统的影响较大。因此,对此类设备的巡视、监测及维护应额外注意。

进一步计算故障树的概率重要度,结果如表 2 所示。

表 2 反映了各事件概率变化对顶层事件变化影响的重要程度。其中,电缆失效(指市政施工等挖伤、挖断电缆的被动故障情况)的概率变化对顶层事件的影响程度位于前列。因此,需要对频繁的电

缆施工进行数据统计分析,形成对施工密集作业区、施工高发时间段等的指导建议,合理安排人员巡视,加强此类设备的保障措施。

表 2 事件的概率重要度

事件编号	事件名称	事件概率
X_{1101}	110 kVI 路电缆失效	0.477 600 0
X_{1102}	110 kVII 路电缆失效	0.477 600 0
X_{123}	110 kV 进线柜失效	0.047 100 0
X_{124}	110 kV 进线柜失效	0.047 100 0
X_{301}	33 kV 进线柜失效	0.023 200 0
X_{301}	33 kV 进线柜失效	0.023 200 0
X_{12}	1B 主变失效	0.022 700 0
X_{22}	2B 主变失效	0.022 700 0
X_{100}	100 母线联柜失效	0.002 000 0
X_{300}	300 母线联柜失效	0.000 021 0
X_{311}	33 kV 馈线柜失效	0.000 020 6
X_{312}	33 kV 馈线柜失效	0.000 020 6
X_{313}	33 kV 馈线柜失效	0.000 020 6
X_{314}	33 kV 馈线柜失效	0.000 020 6

最后结合式(1)-(6),计算基于当前事件概率下的顶层事件(五山主变电所整体退出)发生概率为 0.028 7,即五山主变电所的可靠度为 97.13%。

4 结语

地铁主变电所的重要性不容忽视。本文针对主变电所的可靠性量化与评估开展研究,通过主变电所运行结构方式,采取基于 FTA 法的分析方法构建故障树模型,以下行法求得最小割集的结构集合,评估各类设备对系统的影响程度,通过计算各类事件的概率重要度,进而得出顶层事件的失效概率。

本文所运用的理论方法不但结合系统本身结构特点,且还运用关键设备的运营数据,具备较好的工程应用性。后续将结合整体供电系统进行可靠性综合量化,进一步为运营、维护、应急等能力决策提供科学的量化评估依据。

参考文献

[1] 刘娜,梁国栋,王刘芳,等. 电力变压器故障模式的分析及危害评估[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 3.
[2] 王鹏,张贵新,朱小梅,等. 基于故障模式与后果分析及故障树法的电子式电流互感器可靠性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 15.
[3] DUTUIT Y, RAUZY A. Approximate estimation of system reliability via fault trees[J]. Reliability engineering & system safety, 2005, 87(2): 163.

参考文献

- [1] 张凯, 杜凯, 巨永锋. 基于BP神经网络的提速道岔故障诊断算法[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(11):77.
- [2] 米根锁, 张凤霞, 魏蕾. 基于剩余寿命的铁路轨道电路调整型维修方法研究[J]. 铁道学报, 2015(4):69.
- [3] 张凤霞, 米根锁. 基于健康指数的轨道电路设备寿命预测方法的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12):61.
- [4] 饶永波, 常治元, 杨宗霄, 等. 高速公路机电设备使用寿命预测模型[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(2):12.
- [5] 李章杨, 陆国政, 虞翊, 等. 高铁信号关键设备使用寿命评估方法[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(10):1.
- [6] 戎翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研

究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008:8.

- [7] WU X H, WEN D, LI R G, et al. A model to predict the residual life of aero-engine based upon Support Vector Machine [C]//International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. New York: IEEE, 2013.
- [8] HESS A, FILA L. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems [C]//IEEE. Aerospace Conference Proceedings. New York: IEEE, 2003.
- [9] 野中保雄. 可靠性数据的收集与分析方法[M]. 高金钟, 译. 北京:机械工业出版社, 1988:11-17.
- [10] 尤明懿. 基于状态监测数据的产品寿命预测与预测维护规划方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.

(收稿日期:2018-03-19)

(上接第95页)

度考虑,采用轮缘槽宽较宽、轮缘顶部集成轨顶坡的59R2槽型轨是最佳的选择。若考虑为提高路面的平顺度而选择了槽窄的60R2槽型轨,则转向架需要采用薄轮缘踏面。这样将大大降低了轮缘的使用寿命,增加了车辆维护成本。此外,为实现有轨电车在槽型轨线路和铁路干线线路上的共轨运行,建议尽快设计出匹配国内常用T型轨的槽型轨型面。

参考文献

- [1] European Committee Standardization. Railway applications track special purpose rail grooved and associated construction. : EN 14811—2009 [S]. Brussels: European Committee, 2009:29.
- [2] SAMYN F. Functional Specification for Track infrastructure [R]. Brussels: European Commission, 2010.

- [3] Länder-fachausschusses für Stadtbahnen und andere spurgebundene Ortsverkehrssysteme (LSO). Technische Regeln für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab): TR Sp-2004 [S]. Cologne: Association of German Transport Companies, 2004:43.
- [4] Transportation Research Board. TCRP REPORT 155-2012 [R]. Washington D C: The Federal Transit Administration in cooperation with the Transit Development Corporation, 2012.
- [5] DIN. Nahverkehrs-Schienenfahrzeuge Radreifen-Profil Breite 95 und 110mm. : DIN 25112-1980, [S]. Berlin: Deutsches Institut, 1983.
- [6] Andrés Muñoz de Dios Rodríguez, Pablo Oromí Fragoso. Comparative study on wheel-rail interface and wheel wear in light rail [R]. Brussels: The International Association of Public Transport, 2013.

(收稿日期:2017-03-09)

(上接第99页)

- [4] 张菊, 王若昆. 基于FMECA和FTA的轨道电路系统安全性分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(6):23.
- [5] 杨洋, 谢开贵, 孙鑫. 基于FTA法的宁夏电网运行元件故障率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009(18):134.
- [6] 王洪飞, 施绮. 基于故障树(FTA)方法的二次系统项目评估方法研究[J]. 华东电力, 2014(12):2747.
- [7] 朱云飞, 周凤舞, 凌明胜. FTA在多输出通信网络系统中的应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 3(3):68.
- [8] 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1):56.
- [9] 陆锦军, 王执铨. 基于故障树的校园网通信系统的可靠性分析[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(11):14.
- [10] 丁坚勇, 张华志, 吴新民, 等. 城轨供电系统接触网可靠性的故障树分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009(9):38.

- [11] 曾德容, 何正友, 于敏. 地铁牵引变电所可靠性分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(4):22.
- [12] MÁRQUEZ F P G, PÉREZ J M P, MARUGÁN A P, et al. Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time[J]. Renewable Energy, 2016, 87:869.
- [13] MIRZA S, OMIDVARI M, LAVASANI S M R M. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis[J]. Safety promotion and injury prevention (Tehran), 2014, 2(2):113.
- [14] AKSU S, TURAN O. Reliability and availability of pod propulsion systems[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2006, 22(1):41.
- [15] 魏春荣, 张建华, 张锦鹏. 事故树定性分析法及其在矿井安全评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(9):39.

(收稿日期:2017-04-05)