

交流牵引供电系统对直流供电系统的干扰及 防范措施研究

杨立新¹ 张喜海¹ 戴丽君²

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 300251, 天津; 2. 南京铁道职业技术学院, 210031, 南京//第一作者, 教授级高级工程师)

摘 要 为实现换乘的便利性, 以及为节省用地而共用交通走廊, 城市越来越多的地段出现了交流制式的电气化铁路和直流制式的城市轨道交通线路近距离并行敷设的情况。当交流电气化铁路正常稳态运行或发生故障时, 流过交流电气化铁路的交流电流通过交、直流线路间的电容和互感, 会在直流轨道交通牵引网供电系统上感应出工频电压, 从而导致直流轨道交通牵引网上出现工频电流。阐述了感应电压的危害, 并提出了降低感应电压的防范措施。通过计算分析及试验测试, 说明采用的防范措施能够较好地减少感应电压, 对交、直流系统并行区段的供电系统设计具有指导意义。

关键词 供电系统; 交流制式; 直流制式; 工频感应电压; 防范措施

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.12.023

Interference of AC Traction Power Supply System to DC Power Supply System and Preventive Measures

YANG Lixin, ZHANG Xihai, DAI Lijun

Abstract In order to facilitate passenger transfer and save land by using the traffic corridor, the parallel laying phenomenon of AC-based electrified railway and DC-based urban rail transit lines are increasing in urban areas. When the AC electrified railway is in normal steady state operation or in failure condition, the AC current flowing through AC electrified railway will pass through the capacitance and mutual inductance between the AC and DC lines, and induce the power frequency voltage on the traction network system of DC rail transit, resulting in the power frequency current on the traction network of DC rail transit. In this paper, the harm of induction voltage is expounded, preventive measures of reducing induction voltage are studied. Through calculation analysis and experimental test, it proves that the preventive measures can effectively reduce the induction voltage, therefore has a guiding significance for the design of power supply system in the parallel section of AC/DC systems.

Key words power supply system; AC system; DC system; power frequency induction voltage; preventive measure

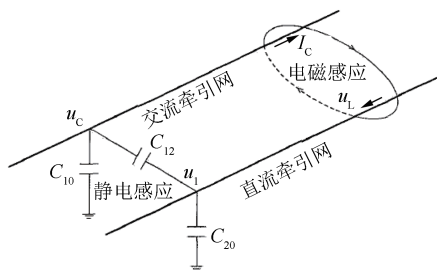
First-author's address China Railway Design Corporation, 300251, Tianjin, China

交流电气化铁路供电系统采用单相工频交流电, 其接触网额定电压为 25 kV。城市轨道交通线路一般采用直流供电方式, 牵引供电系统为 1 500 V (或 750 V) 架空接触网 (或接触轨) 供电。随着我国快速铁路网的逐步形成及城市轨道交通的迅猛发展, 城市轨道交通与高速铁路不可避免地通过在有限的城市区域内共用交通走廊来实现换乘, 因此, 越来越多的地段出现了交流电气化铁路和直流城市轨道交通线路近距离并行的情况。当两线近距离平行架设时, 交流牵引供电系统对直流牵引供电系统产生电磁感应影响, 其通过电容耦合及电感耦合作用在直流供电系统设施上^[1]; 为确保线路安全正常运行, 直流系统电压需控制在 1 000~1 800 V (或 500~900 V) 国标范围内, 钢轨电位需控制 120 V 以内。交流系统与铁路直流供电系统互相干扰问题一旦出现, 将会带来严重的运营安全隐患, 甚至导致列车不能正常运行。据调研, 在我国某些车辆制造工厂的试验线项目中, 为节约土地, 交、直流试验线均紧邻布置, 导致线路运行过程中两系统相互干扰影响而出现某些不正常故障, 目前影响程度尚无明确结论和有效治理措施。

1 交流牵引供电系统对直流供电系统的影响分析

交流制式电气化铁路与直流制式城市轨道交通并行运行, 当交流电气化铁路接触网系统带电运行时, 形成一个巨大的电磁系统, 对周围环境产生电磁影响。一方面, 交流牵引网带电时在其周围空

间将产生一个工频高压电场,通过静电感应,在邻近的城市轨道交通直流牵引网导体上产生对地静电感应电压;另一方面,交流牵引网导体中的交流电流在周围空间中建立很强的交变磁场,通过电磁感应在邻近直流牵引网导体上产生沿线路方向的纵向感应电动势,如图 1 所示。



注: u_c 、 u_l 分别表示交、直流牵引网电压; I_c 表示交流牵引网电流; C_{10} 表示交流牵引网与大地间的电容; C_{20} 表示直流牵引网与大地间的电容; C_{12} 表示交、直流牵引网间的电容; u_1 表示直流牵引网纵向感应电动势

图 1 交、直流牵引网电磁影响示意图

1.1 对直流供电系统设备的影响

直流畅触网(轨)空载状态下,直流电压与交流干扰电压叠加后,有可能产生危险过电压(以 DC 1 500 V 为例,受干扰后峰值计算电压可达到 7 000 V),这样极有可能会危及控制和保护电缆、直流馈电电缆的安全运行以及直流系统整流器等设备的正常使用,从而造成避雷器频繁放电、保护装置跳闸,甚至是对电压敏感元件的电击穿等一系列故障。

直流畅触网(轨)负载状态下,感应电压可能大幅度降低,可能导致测量误差增大、继电保护误动等故障。

1.2 对直流供电系统车辆的影响

现代城市轨道交通车辆采用交流传动技术,交流供电系统的感应电压一般不会导致其电力电子元件发生损坏,但是城市轨道交通车辆上对电压敏感的元件可能会被损坏。又因用于控制和保护交流供电系统设备的工作电源也是直接从受干扰的直流畅触网(轨)获取的,直流电源由于受到交流电干扰,其电压波形叠加了交流成分,再加上对电磁兼容考虑不周时可能会对控制和保护回路造成干扰,从而导致交流供电系统发生不明原因的故障。

1.3 对运营维修的影响

考虑到铁路交流供电系统牵引网带电运行时,城市轨道交通直流供电系统部分设备(如牵引网、环网电缆、接地扁钢等)处于铁路交流牵引供电系统产生的交变电磁场中,将通过静电耦合和磁耦合

在其周围各平行导线上产生感应电压,夜间检修时由于缺少电流导通通路,对城市轨道交通直流牵引供电系统的运营检修人员的安全产生一定影响。

总之,交流电气化铁路线路在运行时会在相邻的直流畅触网(轨)产生电场感应和电磁感应,感应电压叠加后有可能产生危险过电压,对变电所、接触网、车辆设备等带来一定的危害。根据调研和相关资料介绍,目前最严重的情况是偶尔引起车辆保护跳闸,但并未发现烧损现象;而对于一些重要的运输干线,应更多考虑其对信号系统的影响。交流牵引供电系统对运营维修的影响目前仅处于科研立项研究阶段,尚无结论性意见,相信这也是未来行业研究和关注的热点之一。

1.4 直流走行轨感应电压及其影响分析

考虑到直流走行轨与大地完全绝缘,电磁感应和静电感应均会对钢轨产生影响。为解决杂散电流的腐蚀问题,直流系统走行轨采用与大地绝缘的安装方式。尽管上述理论可以计算直流走行轨产生的感应电压,但实际上直流系统走行轨与大地之间存在可以导通交流电的分布电容和漏泄电阻,更重要的是直流系统设置了轨电位限制器,当轨电位超过安全电压允许的 90 V 时系统发生动作,将危险电压泄放到大地上^[3],因此一般情况下直流走行轨的感应电压不会对人身和设备造成危害。目前,既有的交直流试验线尚未有直流系统走行回流轨受交流接触网干扰的相关消息和报道。

2 交流感应电压的防范措施

由前述研究可知,若两种制式下的铁路电力机车和轨道交通列车不同时运行,只需做好相关设备的接地则可有效控制并避免相互干扰问题,否则必须采取必要的措施以解决相互干扰的问题。解决上述问题的主要原则和方法是“堵”和“疏”,“堵”就是应用法拉第电笼概念将干扰源封闭在电笼内,或是将受干扰设备封闭在电笼内;“疏”则是将受干扰设备上的干扰电压泄放到大地上。

经计算及工程实际调研,交流和直流牵引供电系统并行区段水平距离在 20 m 范围内的静电感应和电磁感应可对线路运营产生一定影响,因此提出以下技术方案。

2.1 直流系统相应设施接地

在实际运营中,对交流和直流两种制式列车同时运行的工况进行实测,实测数据显示,交流线

路确实对直流线路产生影响。因此需通过调整运营组织和运行图,使得同一时间段内仅进行一种制式下列车的运行,但这种方式对线路运营影响极大。因此,可考虑采取如下措施,即当感应电压超过要求值后,将城市轨道交通直流系统相应设施接地。该措施仅可满足试验线路的需求,并不能应用于运营线路并行、线路距离较近且可能产生较大感应电压的实际线路工程。

2.2 电磁屏蔽

金属导线、金属结构的两端或者多点接地对磁场均有一定的屏蔽作用,可在一定程度上降低磁影响。电磁屏蔽是解决磁影响问题的重要抑制措施之一。工程上通常采用良导体架空地线、架设在电信线路附件的屏蔽地线、电力或电信电缆的金属护套,以及金属管线和铁轨等来实现电磁屏蔽。若交流输电线路或被感应线路附近存在平行的接地屏蔽线(见图 2),此时被感应线路上产生的感应纵电动势为交流线路和屏蔽线各自感应纵电动势的合成,这将能降低被感应线路上的电压。

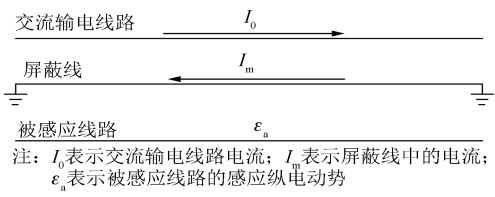


图 2 屏蔽线相对位置示意图

在实际工程中,可采用线间立柱增设屏蔽网(回流线)方案,该方案是不完全封闭的法拉第电笼方案。

2.3 设置感应电压吸收装置

根据电磁感应电压生成原理,在直流侧接触网上设置感应电压吸收装置。该装置的工作原理为:当交流侧带电,悬空直流接触网的静电感应与电磁感应的危险电压就会通过感应电压吸收装置将交流感应电压泄放至大地中。该装置主要由开关、熔断器、陷波支路及电压、电流互感器、监控装置等组成,能够导通交流电流同时阻止直流电流通过,其示意如图 3 所示。考虑到设备的可靠性,建议在一个供电臂内设置两套感应电压吸收装置,其安装示意如图 4 所示。

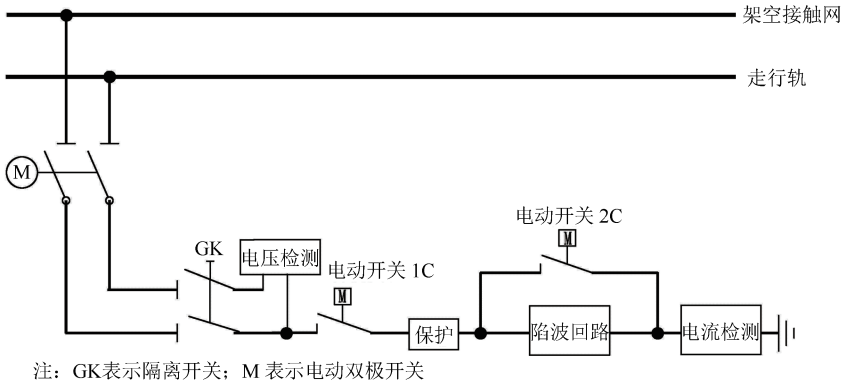


图 3 感应电压吸收装置内部结构示意图

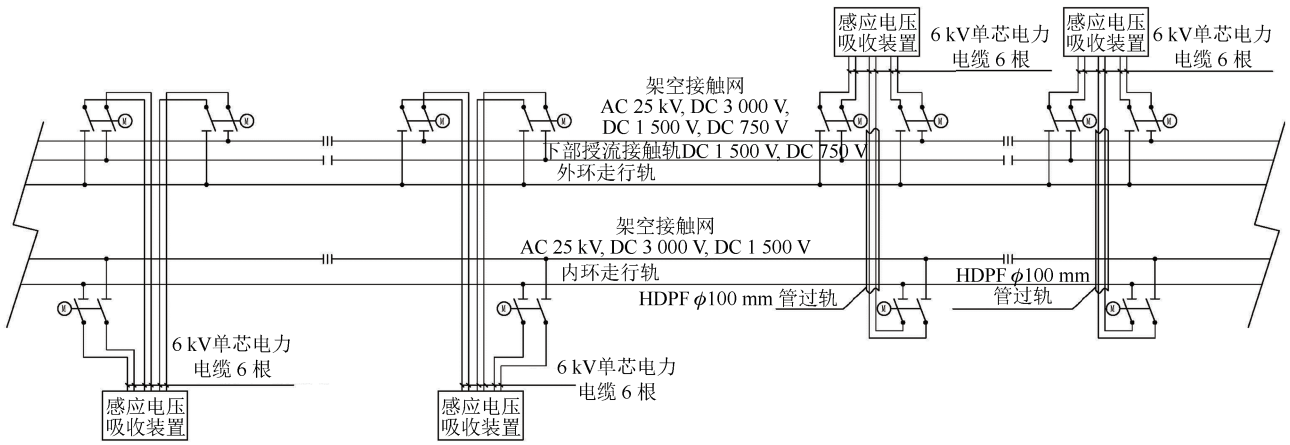


图 4 感应电压吸收装置安装示意图

表 6 上海轨道交通 11 号线牵引逆变器大修项目交付时间表

序号	列车号	送修时间	返厂时间	大修周期/d
第 1 列	1104	2018-06-21	2018-08-08	48
第 2 列	1109	2018-08-24	2018-09-13	20
第 3 列	1114	2018-11-16	2018-12-06	20
第 4 列	1124	2018-12-28	2019-01-15	18
第 5 列	1112	2019-01-14	2019-02-15	32
第 6 列	1101	2019-03-05	2019-03-20	15
第 7 列	1111	2019-04-25	2019-05-11	16
第 8 列	1117	2019-06-18	2019-07-04	16

注:第 1 列列车需开展业主首件检验,不计入正常维修周期;第 5 列列车维修周期包含春节放假

5 结语

通过对牵引逆变器大修流程进行梳理,基于 RCM 理论,将大修流程的各个工艺进行优化重组,建立了牵引逆变器大修流程优化模型并求解。依据上海轨道交通 11 号线牵引逆变器委外供应商 Y 公司的相关数据资料,对模型的可行性进行了验证。结果表明,模型求解理论值较项目交期缩短 3 d,采用优化模型后平均交付时间较项目交期缩短

4.3 d,效率提高了约 21.5%,效果较为显著。虽然本文所选取的项目实践数据样本不够充足,也未排除短期内人为提高维修效率的因素,但根据委外供应商的数据统计和人员反馈表明,此优化模型仍具备较高可行性。

参考文献

[1] 何霖.城市轨道交通车辆架大修管理[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2014.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013: 240-241.

[3] 许秀锋.基于以可靠性为中心的地铁车辆维修[J].城市轨道交通研究,2012.

[4] 于丹丹.基于可靠性的城市轨道交通车辆架修模式优化及方法研究[D].南京:南京理工大学,2007.

[5] SAEED M, MOHSEN M. An improved simulated annealing algorithm in fracture network modeling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2016,33: 538.

[6] DARIUSZ B. Simulation of partial update LMS Algorithms in application to active noise control[J]. Procedia Computer Science,2016,80: 1180.

(收稿日期:2019-08-20)

(上接第 99 页)

表 1 感应电压吸收装置接入前后两导线在不同 d_{JA} 条件下的静电感应电压

d_{JA}/m	电压计算值/V	电压实测值/V	
		装置接入前	装置接入后
1.0	2 200	3 400	0
0.8	2 500	4 200	0
0.6	2 796	5 500	0
0.5	2 933	6 300	0
0.4	3 055	7 200	0

表 2 感应电压吸收装置接入前后两导线在不同 d_{JA} 条件下的电磁感应电压

d_{JA}/m	静电感应电压 计算值/V	静电感应电压实测值/V	
		装置接入前	装置接入后
0.10	5.61	4.05	0.367 0
0.08	5.74	4.38	0.339 7
0.06	5.91	4.77	0.496 0
0.05	6.02	5.29	0.470 0
0.04	6.15	5.43	0.540 0

生电磁影响,其危害程度需要进行具体分析,并进行相应的防护和治理。本文提出 3 种解决方案,其中不采取任何措施,仅依据线路运行中的实测数据进行运行调图或视影响干扰情况确定是否接地的

方案,难以在实际工程中实施,风险亦较高;电磁屏蔽方案可实施性较高,但不能保证完全滤除干扰电压,而且景观性较差;感应电压吸收装置综合性价比最高,对工程、景观均无影响,且投资较小,通过试验测试结果可知,该方案可以较好地降低感应电压,但目前在国内尚无运营线路应用的先例,需要进一步跟踪其进展。本文针对交直流干扰问题提出可以借鉴的解决方案,以期在今后的交直流干扰问题的处理中发挥应有的作用,同时在类似的工程设计中应结合不同的边界条件,在采用推荐治理措施后必须进行测试与验证,以确保牵引供电系统的安全可靠运行。

参考文献

[1] 曹晶.电气化铁路牵引供电系统中电磁兼容的建模与仿真[J].中国铁路,2008(3): 32.

[2] 谭秀炳.交流电气化铁路牵引供电系统[M].成都:西南交通大学出版社,2009.

[3] 王猛.直流牵引供电系统钢轨电位与杂散电流分析[J].城市轨道交通研究,2005(5): 55.

(收稿日期:2019-07-05)