

交直流双制式列车过分相暂态过程仿真研究*

刘卫东¹ 胥伟¹ 刘飞¹ 谢崇豪²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都;

2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 交直流双制式牵引供电系统可满足铁路线路与城市轨道交通线路互联互通的需求。以国内首条交直流双制式线路(重庆市郊铁路跳磴至江津线)为例,建立了双制式列车通过锚段关节式电分相过程的等值电路模型及双制式列车过分相过程仿真模型,分析了列车通过锚段关节式电分相时的暂态特性,并提出了抑制过电压的具体方案。对江跳线进行仿真,结果表明:列车通过锚段关节式电分相时在交流和直流接触网分别产生了64.11 kV和13.83 kV的过电压,该过电压大小与交流接触网的电压相位角和谐波有关。加装阻容保护器能够有效抑制列车通过关节式电分相时产生的过电压。

关键词 市郊铁路;牵引供电系统;交直流双制式;电分相;暂态过程;过电压

中图分类号 U239.5; U264.2⁺31

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.018

Research on Transient Process of AC/DC Dual-system Locomotive Passing Electric Phase Separation by Simulation

LIU Weidong, XU Wei, LIU Fei, XIE Chonghao

Abstract The AC/DC dual-system traction power supply system can meet the needs of interoperation between railways and urban rail transit. Equivalent model of AC/DC dual-system locomotive passing through the anchor joint articulation phase separation process is established. The simulation model of dual-system locomotive passing electric phase separation is established, and the transient characteristics of the locomotive passing through the anchor joint articulation phase is analyzed. Specific scheme of overvoltage suppression is proposed. Taking the first domestic AC/DC dual-system line (Chongqing Jiangtiao Railway) as example case for simulation, results show that the locomotive will cause an overvoltage of 64.11 kV in AC contact grid and 13.83 kV in DC contact grid through the anchor joint electric phase separation. The magnitude of overvoltage is related to the phase angle and harmonics

of the AC contact network voltage. Installing RC protector can effectively suppress overvoltage when locomotive passing through joint electric phase separation.

Key words suburban railway; traction power supply system; AC/DC dual-system; electrical phase separation; transient process; overvoltage

First-author's address China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

我国干线铁路普遍采用交流供电制式,城市轨道交通主要采用直流供电制式。交直流双制式(以下简称“双制式”)作为一种新型的牵引供电系统技术,能够实现列车在铁路和城市轨道交通两种系统间的快速通行,满足互联互通的运营需求^[1-2]。

双制式列车过分相时会出现电磁暂态过程,产生各类过电压,进而威胁牵引供电系统的正常运行。目前我国尚无双制式牵引供电系统的运营案例,也鲜见双制式列车过分相暂态过程的研究。文献[3]介绍了双制式牵引供电系统的构成,并对其主要设备选取等方面进行了研究。文献[4]对传统交流制式牵引供电系统过关节式电分相暂态过程进行了仿真研究,分析产生过电压的原因,并提出了过电压抑制措施。文献[5-6]对双制式电力列车供电模式切换过程的暂态特性进行了研究,分析了该类型列车牵引传动系统在供电模式切换过程中产生的暂态电压和电流冲击对接触网的影响,但并未考虑车-网耦合状态下双制式电力列车过分相过程对接触网造成的冲击。因此,研究双制式列车过分相过程所产生的过电压对交直流接触网网压造成的影响,优化双制式牵引供电系统电分相的设计方案,对双制式牵引供电系统的运维具有重要意义。

1 双制式牵引供电系统结构分析

重庆市郊铁路跳磴至江津线(以下简称“江跳

* 中铁二院工程集团有限责任公司科技研究开发项目(KYY2018022(18-20))

线”)是我国首条采用双制式的轨道交通线路。本文以江跳线为案例进行双制式牵引系统的研究。该线位于重庆市的西南部,由东向西串联重庆轨道交通 5 号线、5 号线支线、7 号线和 17 号线,是重庆市江津区与主城区连接的主要快速通道。

江跳线从起点(跳蹬站)至中梁山隧道前的区段为直流侧,采用直流 1 500 V 架空接触网供电方式。其余区段为交流侧,采用单相工频 25 kV 交流制式、带回流线直接供电方式,并设有供列车交直流转换的区域。双制式牵引供电系统如图 1 所示。

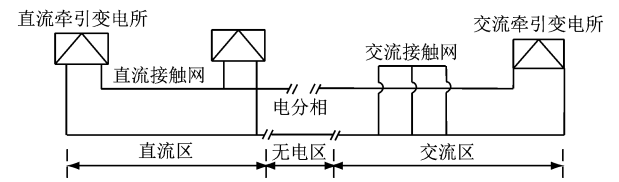


图 1 交直流双制式牵引供电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC/DC dual-system traction power supply system

在设计近期,江跳线车辆采用双流制 As 型车,列车为 6 节编组,设有 2 个牵引受电单元。如图 2 所示,每个牵引受电单元装有 2 个受电弓,弓间距为 13 m,且与母线连通;非连通受电弓的最大间距为 73 m。

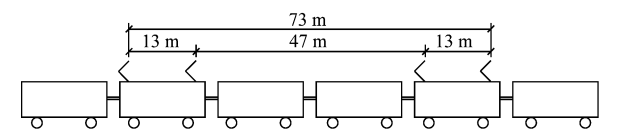


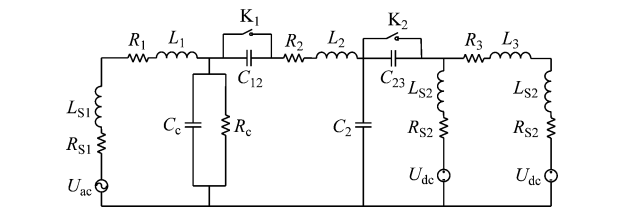
图 2 交直流双制式列车牵引受电单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AC/DC dual-system locomotive traction power receiving unit

2 双制式列车过分相过程等值模型

双制式列车在进入电分相之前,其主断路器需确保处于断开状态,因此过分相过程只有受电弓和网压互感器与牵引供电系统有电气联系。双制式列车通过锚段关节式电分相、由交流段行驶至直流段的等值电路如图 3 所示。

当双制式列车受电弓短接中性线和交流接触网时,等效于开关 K_1 由断开状态转为闭合状态,如图 4 所示。由图 4 可知,此时列车过分相过程所产生的暂态电压主要与交流接触网电压源、中性线上原有感应电压及中性段电气参数有关。



注: U_{ac} ——交流侧电压源; U_{dc} ——直流侧电压源; R_{S1} 、 L_{S1} ——分别为交流变压器的等值电阻和电感; R_1 、 L_1 ——分别为交流侧接触网的等值电阻和电感; R_2 、 L_2 、 C_2 ——分别为无电区中性线的等值电阻、电感和对地电容; R_{S2} 、 L_{S2} ——分别为直流变压器的等值电阻和电感; R_3 、 L_3 ——分别为直流侧接触网的等值电阻和电感; R_c 、 C_c ——分别为列车等效电阻和受电弓对地电容; C_{12} ——交流接触网和无电区接触网之间的等效电容; C_{23} ——直流接触网和无电区接触网之间的等效电容; K_1 、 K_2 ——为等效切换开关。

图 3 双制式列车通过锚段关节式电分相等值电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of dual-system locomotive passing through anchor joint electrical separation phase

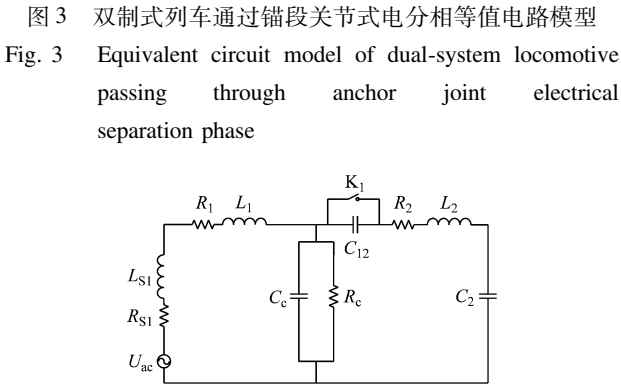


图 4 列车从交流段进入中性段时的等值电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model of train entering neutral section from AC section

当列车受电弓与交流接触网断开连接、仅与中性线接触时,等效于开关 K_1 由闭合状态转为断开状态,如图 5 所示。由图 5 可知,此时列车过分相过程所产生的暂态电压主要与中性线上原有感应电压和中性段电气参数有关。

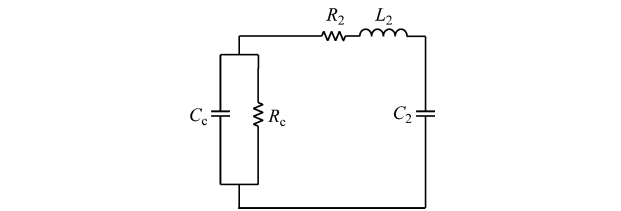


图 5 列车受电弓与交流段接触线分离时的等值电路模型

Fig. 5 Equivalent circuit model of train pantograph and AC section contact line separation

当列车通过中性段后,受电弓从仅与中性线连接转为短接中性线和直流段接触线,等效于开关 K_2 由断开状态转为闭合状态,如图 6 所示。由图 6 可知,此时列车过分相过程所产生的暂态电压主要与

中性线上原有感应电压、中性段电气参数及直流侧接触网电压源有关。

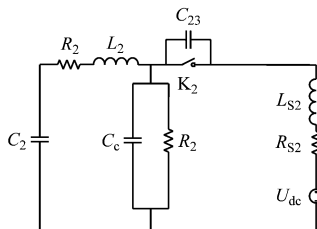


图6 受电弓短接中性线与直流段接触线时的等值电路模型
Fig. 6 Equivalent circuit model of pantograph shorting neutral line and DC contact line

当列车驶出电分相,受电弓与中性线断开连接,仅与直流段接触线相连,等效于开关 K_2 由闭合状态转为断开状态,如图7所示。由图7可知,此时列车驶入直流侧与中性线断开连接,由于直流侧采用双边供电,等值电路难以发生振荡。

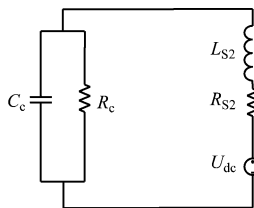


图7 受电弓仅与直流段接触线连接时的等值电路模型
Fig. 7 Equivalent circuit model when the pantograph is only connected to the DC contact line

3 双制式列车过分相仿真与分析

3.1 列车过分相暂态过程仿真与分析

根据上文的等值电路模型,本文建立了双制式列车过锚段关节式电分相时的 MATLAB/Simulink 仿真模型,如图8所示。

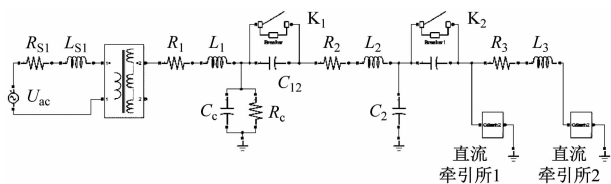


图8 双制式列车过锚段关节式电分相仿真模型
Fig. 8 Simulation model of dual-system locomotive passing through anchor joint electrical separation phase

利用开关的闭合与断开状态模拟双制式列车进出锚段关节式电分相全过程,得到暂态过电压波形如图9~11所示。

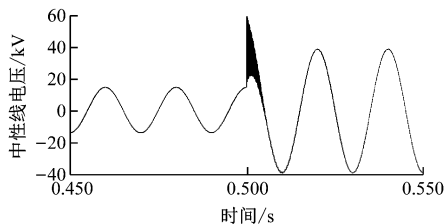


图9 受电弓短接交流接触网与中性线时的暂态电压
Fig. 9 Transient voltage of pantograph short-connected AC catenary and neutral line

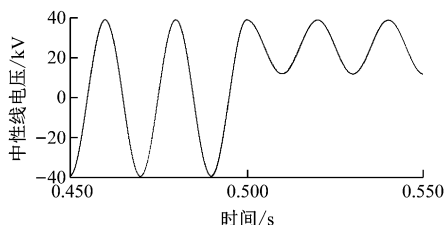


图10 受电弓与交流接触网断开时的暂态电压
Fig. 10 Transient voltage of disconnection between pantograph and AC catenary

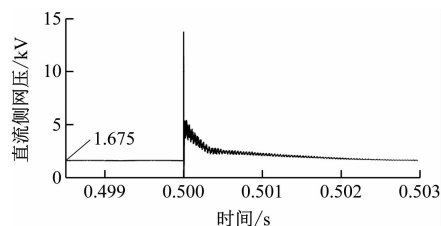


图11 列车进入直流侧时的暂态电压
Fig. 11 Transient voltage of locomotive entering DC side

由图9可知,当列车受电弓同时接触交流接触网与中性线时,将造成等值电路改变,从而引发振荡,产生较大的暂态过电压。由图10可知,在受电弓与交流接触网断开时,过电压现象不明显,这主要是因为双制式列车采用了电阻分压式的网压互感器。由图11可知,在受电弓短接直流接触网与中性线时,因等值电路的变化产生了剧烈的过电压现象,对直流接触网的安全运行造成极大威胁。但随后在受电弓与中性线断开连接时,由于直流侧双边供电及中性线长度较短等原因,等值电路的变化未引起暂态振荡。

3.2 列车过分相暂态过程的影响因素分析

3.2.1 接触网电压相位角

列车过关节式电分相暂态过程中,中性线上的电压幅值与交流侧供电电源相位有关。改变交流侧电源的初始相位,得到该暂态过程暂态电压峰值与交流接触网电压相位角的关系如图12所示。由

图 12 可知,列车过分相时所产生的暂态过电压幅值与交流接触网电压相位角有关,且存在一定的随机性。当交流接触网电压相位角为 90° 时,交流侧过电压达到 64.11 kV,为交流侧额定电压的 2.56 倍。此时直流侧过电压达到 13.83 kV,为直流侧额定电压的 9.22 倍,存在一定的安全隐患。

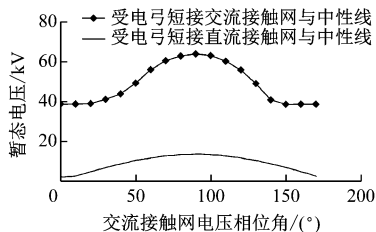


图 12 不同交流接触网电压相位角下的暂态电压仿真

Fig. 12 Transient voltage simulation diagram at different voltage phase angles of AC catenary

3.2.2 牵引网谐波

上述模型中使用的均为理想电压源,但实际线路中由于非线性负载的接入,接触网电压含有一定的谐波电压。本文以我国某城市轨道交通线路为案例,取该线路的实测数据作为电压源进行仿真分析,得到的仿真结果如图 13~14 所示。

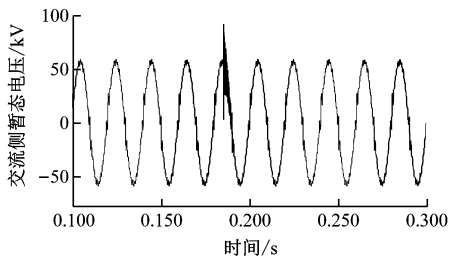


图 13 谐波作用下受电弓短接交流接触网与中性线时交流侧的暂态电压仿真

Fig. 13 AC side transient voltage simulation of pantograph short-connected AC catenary and neutral line under harmonic action

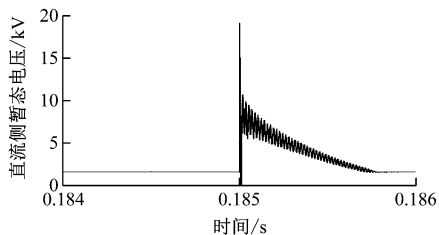


图 14 谐波作用下受电弓短接直流接触网与中性线时直流侧的暂态电压仿真

Fig. 14 DC side transient voltage simulation of pantograph short-connected DC catenary and neutral line under harmonic action

由图 13~14 可知,当接触网电压含有一定的谐波分量时,双制式列车过分相过电压现象将加剧。在谐波作用下,列车受电弓短接交流接触网与中性线时的过电压可达 91.84 kV,短接直流接触网与中性线时的过电压可达 19.13 kV。为保障双制式牵引供电系统的正常运行,建议在轨道交通线路设计时加装过分相暂态过电压抑制装置。

4 双制式列车过分相设计的优化方案

在牵引供电系统中,阻容保护器装置常用于抑制列车过关节式电分相时产生的暂态过电压。其原理是通过改变中性段的电气结构,使列车过分相过程的等值电路不发生振荡,进而有效控制暂态过电压。

在双制式牵引供电系统中,阻容保护器电阻值和电容值的选取不仅要保证列车进出交流侧接触网时能降低暂态电压的峰值,还要保证列车进出直流侧接触网时的短时最高暂态电压和最低暂态电压均不超标。为此结合文献[7],本文确定阻容保护器的电容值为 $0.12 \mu\text{F}$,电阻值为 150Ω 。

本文对交流接触网电源初始相位角为 90° 时列车受电弓短接交流接触网与中性线、受电弓短接直流接触网与中性线两种工况下的暂态过程进行仿真,得到加装阻容保护器装置后暂态电压的波形如图 15~16 所示。

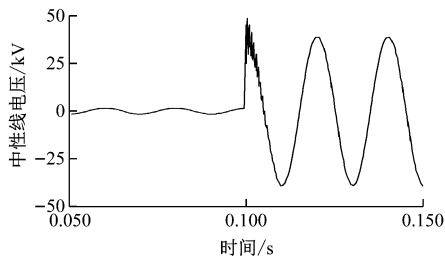


图 15 安装阻容保护器后受电弓短接交流接触网与中性线时的暂态过电压

Fig. 15 Transient overvoltage of pantograph short-connected AC catenary and neutral line after installing RC protector

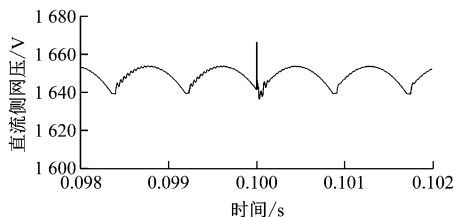


图 16 安装阻容保护器后列车进入直流侧时的暂态过电压
Fig. 16 Transient overvoltage of the locomotive entering DC side after installing the RC protector

由图 15~16 可知,阻容保护器装置对抑制列车通过关节式电分相时所产生的过电压效果明显:受电弓短接交流接触网与中性线时,暂态过电压降至 48.43 kV;受电弓短接直流接触网与中性线时,短时最高电压降至 1 667 V,短时最低电压升至 1 636 V,符合 GB/T 1402—2010《轨道交通 牵引供电系统电压》的规定。

5 结论

本文建立了双制式列车通过锚段关节式电分相过程的暂态模型,对列车过分相各个阶段进行了仿真分析,并提出了抑制过电压的设计优化方案。通过对以重庆市郊铁路江跳线为案例进行仿真,得到结论如下:

1) 双制式列车在通过锚段关节式电分相时,在交流接触网产生了 64.11 kV 的过电压,在直流接触网产生了 13.83 kV 的冲击电压。这对于列车和相关电气设备而言,均存在一定的安全隐患。

2) 交流接触网电压相位角使得过电压现象的发生存在随机性,而谐波电压将导致过电压现象加剧。

3) 加装阻容保护器装置能够改变中性段的电气结构,从而有效地抑制列车通过关节式电分相时所产生的过电压。

参考文献

- [1] 杨耀. 国外大城市轨道交通市域线的发展及其启示[J]. 城市轨道交通研究,2008(2):17.
YANG Yao. Development of suburban rail transit in foreign me-

- tropolis[J]. Urban Mass Transit, 2008(2):17.
[2] 胥伟,刘卫东,刘飞. 交直流双制式城市轨道交通方案设计与关键技术探讨[J]. 电工技术,2020(13):60.
XU Wei, LIU Weidong, LIU Fei. Design of AC/DC dual-standard urban rail transit scheme and discussion of key technologies[J]. Electric Engineering, 2020(13):60.
[3] 杨春燕. 电力列车与城轨车辆双制式牵引供电系统的研究[D]. 大连:大连交通大学,2009.
YANG Chunyan. The research of dual-mode traction power supply system for electric locomotive and urban rail vehicle[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2009.
[4] 张远,黄彦全,张培,等. 电力列车关节式电分相过电压分析与抑制研究[J]. 电气化铁道,2017(2):40.
ZHANG Yuan, HUANG Yanquan, ZHANG Pei, et al. Analysis and suppression research on overvoltage of electric locomotive articulated electrical separation phase[J]. Electric Railway, 2017(2):40.
[5] 徐恺. 双流制电力列车供电模式切换过程暂态特性研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
XU Kai. The research of the double electric locomotive's transient characteristics during the switching different supply systems process[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
[6] 许勇奇. 双流制电力列车供电制式切换过程暂态特性及治理方法[D]. 长沙:湖南大学,2016.
XU Yongqi. The transient characteristics and solutions of double-system electric locomotives during the process of switching its supply systems[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
[7] 律方成,韩芳,汪佛池,等. 动车组过分相铁磁谐振及抑制方法仿真研究[J]. 电瓷避雷器,2016(1):134.
LYU Fangcheng, HAN Fang, WANG Fochi, et al. Simulation study of methods for restraining and EMU passing phase ferroresonance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(1):134.

(收稿日期:2020-05-14)

上海首条长江越江轨道交通建设取得重大进展

2022年6月22日上午,在上海崇明长兴岛 G40 沪陕高速与金岸路交叉口东南侧地块,正在对基坑顶板进行最后的浇筑作业。这标志着上海轨道交通崇明线 108 标大小盾构转换段主体结构工程顺利封顶,成为该线工程中首个结构封顶的单位工程。

上海轨道交通崇明线将首次以全地下形式两次穿越长江。108 标大小盾构转换段基坑采用明挖顺作法施工,呈南北向布置,为地上二层、地下二层(局部地下四层)单柱双跨混凝土箱形结构。作为国内轨道交通一次性掘进距离最长的大直径泥水平衡盾构法隧道,位于长兴岛上的 108 标与 111 标两处大小盾构转换段,将是该线越江单洞双线超大盾构与长兴岛站双洞双线小盾构至关重要的转换点,也是实现穿越长江最重要及最困难的工程节点之一。108 标工程在工程建设复工复产后,顺利实现主体结构封顶,为后续 13m 超大盾构穿越长江工程建设推进创造了有利条件。

(摘自 2022 年 6 月 22 日央视网新闻网,记者盛瑾瑜、史晨阳报道)