

## 动车组合闸过电压故障机理分析及仿真研究\*

张明锐<sup>1</sup> 张宁川<sup>1</sup> 刘正威<sup>2</sup>

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春)

**摘要** [目的] 动车组出分相时, 断路器合闸产生的过电压会加剧高压设备的绝缘老化, 研究合闸过电压的产生机理及影响因素对动车组主电路绝缘匹配和设备选型具有理论意义。[方法] 结合动车组主电路结构和过分相过程, 分析其正常运行方式下操作过电压的形成原因。考虑真空断路器合闸弹跳特性对过电压的特殊影响, 建立动车组主电路仿真模型; 对比研究动车组主电路合闸过电压特征, 得出主回路状态动作时刻、动车组高压电缆参数、接触网参数及设备特性对过电压的影响规律。[结果及结论] 极端状态下过电压峰值为工频电压峰值的 2.39 倍, 接近《高速动车组整车试验规范》规定的 2.4 倍, 在极端工况下产生的过电压会对动车组高压设备的绝缘性能产生影响, 甚至导致击穿现象。因此, 需采取如采用相控合闸技术控制断路器在目标相位闭合、选择单位分布电容较小的高压电缆、改进真空断路器的机械特性等相关措施进行防范, 以有效降低动车组合闸过电压。

**关键词** 动车组; 真空断路器; 弹跳特性; 操作过电压

**中图分类号** U266.23<sup>+</sup>4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.06.016

## Mechanism Analysis and Simulation Study of Closing Overvoltage Fault in EMU Circuit Breaker

ZHANG Mingrui<sup>1</sup>, ZHANG Ningchuan<sup>1</sup>, LIU Zhengwei<sup>2</sup>

(1. Electronic and Information Engineering School of Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] The overvoltage caused by circuit breaker closing will aggravate the insulation aging of high voltage equipment when EMU (electric multiple units) passes neutral section. The research on the mechanism and influencing factors of overvoltage caused by circuit breaker closing provides significant theory for the insulation matching and equipment selection of EMU main circuit. [Method] Based on the EMU main circuit structure and the process of passing neutral section, the causes of overvoltage during breaker closing under

normal operation is analyzed. In consideration of the special influence of vacuum circuit breaker closing bounce characteristics on overvoltage, a simulation model of EMU main circuit is established. By comparative study of the overvoltage characteristics of EMU main circuit breaker closing, the influence patterns of main circuit action time, parameters of EMU high voltage cable, parameters of catenary and equipment characteristics on overvoltage are obtained. [Result & Conclusion] In extreme conditions, the peak overvoltage is 2.39 times the peak power frequency voltage, close to 2.4 times the stipulated value in the "Testing specifications of high-speed electric multiple unit on completion of construction". The overvoltage generated in extreme conditions will affect the insulation performance of the EMU high voltage equipment, even leading to breakdown phenomenon. Therefore, it is necessary to adopt the phase controlling closing technology for the circuit breaker to close at the target phase, select the high voltage cable with small capacitance of unit distribution, improve the mechanical characteristics of the vacuum circuit breaker and other relevant preventive measures, and finally to effectively reduce the EMU closing overvoltage.

**Key words** electric multiple units; vacuum circuit breaker; bouncing characteristic; operating overvoltage

由于动车组主电路中存在大量电感和电容, 因此主断路器的动作会使储能元件的工作状态发生改变, 可能导致主电路出现电磁振荡现象, 产生极端过电压, 这会加速动车组设备的绝缘老化甚至发生击穿现象, 从而影响动车组的正常运行。

针对动车组的过电压产生机理和抑制措施, 已经有较多的文献做了理论和试验研究。文献[1]分析了断路器闭合时城际动车组车体的过电压, 得出整车过电压呈对称性分布的规律, 在各车厢内增加一个接地电阻器能有效降低各车车体的过电压。文献[2]分析了 CRH3 动车组在不同网压相位时打开断路器时弓头的过电压波形, 在网压相位为 90°、

\* 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重点课题(N2022J044)

270°时断开断路器,产生的过电压幅值最大。文献[3]分析了动车组牵引变压器两侧的过电压,提出通过减小干扰源与设置过电压协放通路降低过电压的措施。文献[4]分析了断路器分闸时动车组车体过电压,认为牵引变压器励磁电感、高压电缆单位分布电容、接地电阻器的电感值是影响车体过电压的主要因素。文献[5]分析了动车组断路器合闸时主断路器极间触头烧损故障,得出了断路器断口间可能发生的最大过电压,并改进优化了断路器绝缘,降低了操作过电压产生的击穿事故概率。

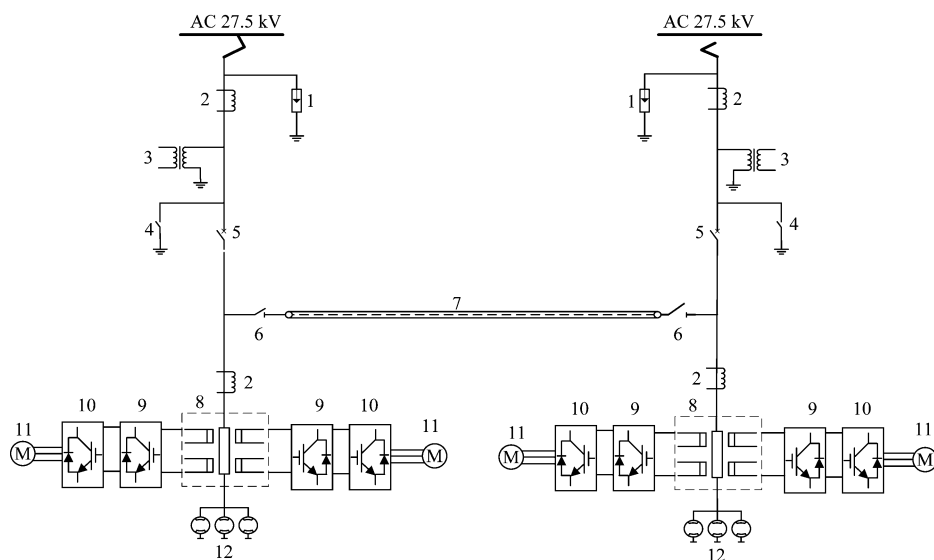
以上研究从不同角度分析了动车组过电压的影响因素或抑制措施,但是针对动车组合闸过电压问题,尚缺乏系统性的、全局性的分析和认识。本文结合动车组典型运行方式,系统研究主电路合闸过程中,合闸相位、高压电缆分布电容大小、接触网阻抗以及断路器触头弹跳对合闸过电压的影响,可为高速动车组的绝缘设计和绝缘事故分析提供

参考。

## 1 动车组主电路

### 1.1 动车组主电路分析

动车组主电路回路结构图如图1所示。动车组正常工作时,受电弓从接触网滑动受流,获得有效值为27.5 kV、频率为50 Hz的单相交流电。电流通过电流互感器、电压互感器、真空断路器后传输到牵引变压器的原边绕组,经牵引变压器降压后,通过整流、滤波、逆变,供给牵引电机,驱动动车组。动车组为8辆编组,采用4动4拖的牵引结构,其中2动2拖为一个基本牵引传动单元。动车组共有2个受电弓,分别安装在2号、7号动力车车顶,两者通过车顶高压电缆相连。动车组正常运行时,同一时刻,只升起后侧受电弓,前侧受电弓处于折叠备用状态。



注: 1—避雷器; 2—电流互感器; 3—电压互感器; 4—接地开关; 5—断路器; 6—隔离开关; 7—高压电缆; 8—牵引变压器; 9—整流器; 10—逆变器; 11—电机; 12—接地回流。

图1 动车组主电路回路结构图

Fig. 1 Main circuit structure diagram of EMU

### 1.2 动车组过分相与过电压故障

为了减小单相牵引负荷对电力系统三相不平衡的影响,牵引变电所实行轮流换相供电制,为防止接触网相邻供电臂短路,须采用绝缘分段,称之为“电分相”<sup>[6]</sup>。为适应高速动车组的大负荷供电需求,目前大多采用锚段关节实现电分相。

根据牵引供电网和动车组运行要求,动车组在过分相时,须断电运行。过分相前,断路器分闸,动

车组依靠惯性惰行通过电分相;动车组驶出电分相后,断路器合闸,动车组从接触网获取电能,继续运行。

近年来,发生了多起动车组断路器接地触头放电烧损事故,故障多发生在动车组出分相时断路器闭合瞬间,故障原因为闭合断路器瞬间操作过电压过高,极间空气间隙被击穿。

## 2 动车组合闸过电压分析

### 2.1 断路器合闸过电压产生机理

动车组断路器动作时,受电弓始终保持升弓状态,因此在考虑操作过电压时,可以将受电弓等效为闭合的导线。正常工况下,断路器动作前,牵引变压器处于空载状态,可以利用并联的电感电容电路来等效。断路器的合闸过程使用时控开关 K 模拟<sup>[7-8]</sup>,牵引变电所电源用  $U_s$  等效,接触网按照集总参数等效,接触网导线电阻、电感分别用  $R_s$ 、 $L_s$  表示。牵引变压器的励磁电感为  $L_T$ ,牵引变压器及高压电缆对地电容等效为  $C_T$ ,主电路中流过的电流为  $I$ 。断路器合闸等效主电路模型图如图 2 所示。

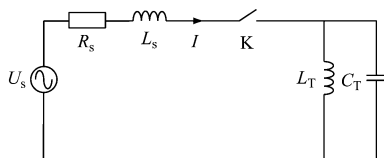


图 2 断路器合闸主电路模型图

Fig. 2 Main circuit diagram of circuit breaker closing

当断路器闭合时,牵引变电所电源  $U_s$  通过接触网向高压电缆和变压器的等效对地电容  $C_T$  充电,动车组牵引变压器励磁电感为 147 H,接触网按照集总参数等效,等效电感  $L_s$  为 35.7 mH,由于  $L_T \gg L_s$ ,所以在断路器闭合瞬间, $L_T$  相当于开路,回路振荡角频率  $\omega_0$  为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_T}} \quad (1)$$

由于  $C_T$  较小,因此在闭合的暂态过程中,回路会出现高频振荡现象。

对图 2 进行频域分析,根据基尔霍夫定律列出回路方程:

$$\left( SL_s + R_s + \frac{1}{SC_T} \right) I = \frac{U_s}{S} \quad (2)$$

式中:

$S$ ——复频率。

由式(2)可得等效电容两侧电压  $U_c$  为:

$$U_c(S) = \frac{U_s}{S(S^2 L_s C_T + SR_s C_T + 1)} \quad (3)$$

假设在合闸前,等效电容  $C_T$  没有初始状态,则其两侧时域电压  $u(t)$  为:

$$u(t) = U_s \left[ 1 - e^{-\frac{R_s}{2L_s} t} \cos(\omega_0 t) \right] \quad (4)$$

式中:

$t$ ——时间。

由式(4)可知,合闸产生的过电压实际由两部分组成,一部分是接触网电压,另一部分是叠加在接触网电压上的高频振荡电压。当  $t = \pi/\omega_0$  时,过电压取得最大值,其表达式为:

$$u(t) = U_s \left( 1 + e^{\frac{\pi R_s}{2} \sqrt{\frac{C_T}{L_s}}} \right) \quad (5)$$

可见闭合断路器产生的过电压峰值与合闸时间、电路中的高压电缆分布电容及接触网参数取值有关。除此以外,真空断路器触头合闸过程中的弹跳现象也会对过电压峰值产生影响。通过建立仿真模型,对合闸过电压影响因素进行研究。

### 2.2 牵引网供电方式与动车组仿真模型

我国电气化铁路牵引供电系统采用单相工频交流供电制,沿铁路修建的地面牵引变电所将公共电网 110 kV/220 kV 三相交流电变换为单相 27.5 kV 交流电后,经馈线向接触网供电。在选择铁路牵引供电方式时,主要考虑线路载流量、钢轨电位、供电距离等因素。目前,牵引供电系统可选用的供电方式主要分为:直供方式、带回流线的直供方式、AT(自耦变压器)供电方式等。国内外高速牵引供电系统基本都采用 AT 供电方式。AT 供电方式的供电能力强,牵引网阻抗小,电能损失小,且供电距离长,因此更适应动车组的运行需求。

变电所间距一般为 25 ~ 30 km,接触网长度小于电磁波传播距离,因此可将接触网按照集总参数模型等效,供电臂长度设置为 25 km,接触网导线电阻  $R_s$  为 4.45  $\Omega$ ,电感  $L_s$  为 35.7 mH,接触网与钢轨间的等效电容  $C_s$  为 0.134 2  $\mu\text{F}$ 。高压电缆铺设于动车组车顶,并通过车顶实现接地,电缆在每节车厢上长度约为 26 m,其单位电阻  $R_d$  为 0.05  $\Omega/\text{km}$ ,单位电感  $L_d$  为 0.17 mH/km,单位电容  $C_d$  为 0.32  $\mu\text{F}/\text{km}$ 。电压互感器接地端与车体相连,其励磁电感  $L_T$  为 100.9 H。动车组单节车厢长 25.5 m、宽 3.1 m、高 4.4 m,将车厢等效为四边电路,其每边电感  $L_c$  和电阻  $R_c$  用串联支路表示,根据数字电桥测试结果, $L_c$  为 0.51  $\mu\text{H}$ , $R_c$  为 2.28 m $\Omega$ <sup>[4]</sup>。相邻车厢间距 1.5 m,车厢间连接电阻  $R_j$  为 0.02 m $\Omega$ 。动车组接地电阻  $R_l$  将工作电流导入钢轨,其大小为 6.5 m $\Omega$ <sup>[9-10]</sup>。钢轨单位电阻  $R_g$  为 0.135  $\Omega/\text{km}$ ,单位电感  $L_g$  为 0.44 mH/km。牵引变压器容量设置为 5848 kVA,其一次侧电压为 27.5 kV,二次侧电压为 1 850 V, $C_i$  表示牵引变压器分布电容。在断

路器动作前,动车组完成退级操作,切断牵引负荷,使牵引电流减小为零,因此变压器二次侧相当于断

路状态。根据上述数据,建立如图3所示仿真模型,利用该模型对动车组合闸过电压现象进行仿真分析。

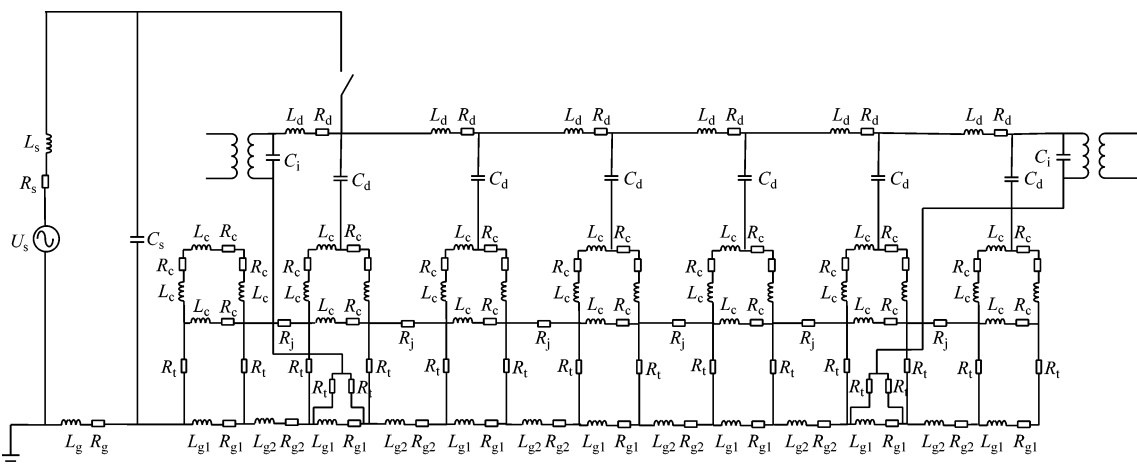


图3 动车组主电路仿真模型

Fig. 3 Simulated model of EMU main circuit

### 3 断路器合闸过电压影响因素

#### 3.1 合闸相位

根据式(3)可知,过电压幅值大小与合闸时刻

密切相关。设置电源电压初始相位为 $0^\circ$ ,分别对 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 相位合闸情况进行仿真,电压波形如图4所示。绘制合闸时电压相位与合闸后过电压峰值的函数曲线,如图5所示。

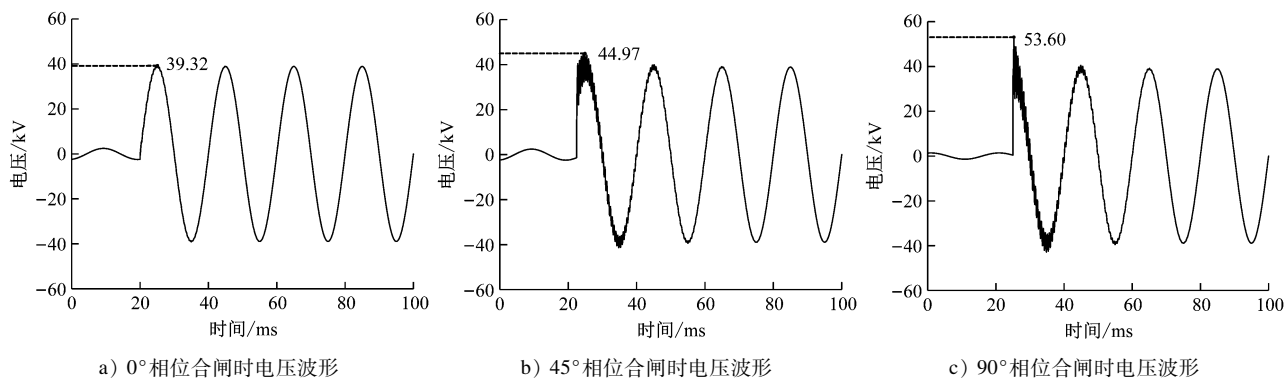


图4 不同相位下合闸时过电压波形

Fig. 4 Closing overvoltage waveform under different phases

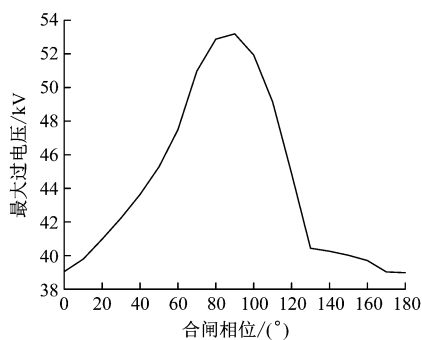


图5 合闸时电压相位与合闸后过电压幅值关系图

Fig. 5 Relation between closing voltage phase and overvoltage amplitude after closing

由图4和图5可知,合闸时,电压相位越接近 $90^\circ$ ,合闸过程中产生的操作过电压峰值越大,主电路中电容电感等储能元件产生的高频振荡衰减时间越长。

#### 3.2 高压电缆分布电容取值

动车组采用动力分散配置,电能通过高压电缆传递到前后两个动力单元。高压电缆屏蔽层通过车顶接地,每节车厢上的电缆屏蔽层在车厢连接处断开,且均有一个连接车顶的接地点。高压电缆剖面结构如图6所示。

高压电缆与车顶间的等效分布电容是影响合

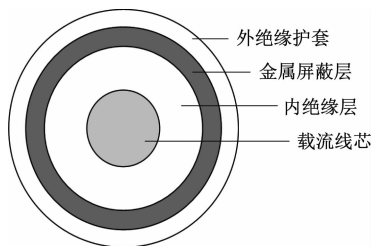


图6 高压电缆剖面图

Fig. 6 High voltage cable profile

闸过电压的重要因素之一。绝缘材料的性质、电缆线芯半径、绝缘厚度等因素都会影响电缆的单位分布电容大小。在  $90^\circ$  相位合闸的情况下,表 1 给出了不同分布电容取值下过电压峰值的情况。

表 1 不同高压电缆分布电容取值下过电压峰值

Tab. 1 Peak value of overvoltage under different distributed capacitance values of high-voltage cables

分布电容/(nF/m)	过电压峰值/kV
0.05	40.83
0.10	43.45
0.32	53.06
1.00	67.65
10.00	79.28

从表 1 可以看出:当高压电缆分布电容取最小值 0.05 nF/m 时,过电压峰值为 40.83 kV;随着高压电缆分布电容取值增大,过电压峰值随之增大;当分布电容取值为 10 nF/m 时,过电压峰值达到 79.28 kV。

### 3.3 接触网阻抗

由动车组断路器合闸模型理论分析可知,过电压幅值大小与接触网阻抗有关。我国最短的分相区间距为 9.843 km,位于溆浦南站—怀化南站区段,而变电所间距一般为 25~30 km。在  $90^\circ$  相位合闸的情况下,可以通过改变接触网参数  $R_s$ 、 $L_s$  和  $C_s$ ,以 5 km 为一个单位,观察动车组合闸过电压峰值与接触网阻抗的关系,结果如表 2 所示。

表 2 不同分相间距情况下过电压峰值

Tab. 2 Peak value of overvoltage under different neutral section

分相间距/km	过电压峰值/kV
10	62.94
15	58.93
20	55.39
25	53.06
30	51.12

由表 2 可知,网侧阻抗的增大对合闸过电压有抑制效果,列车在距离牵引变电所越远的位置进行合闸操作,所产生的振荡过电压越小。

### 3.4 断路器触头弹跳

真空断路器采用对接式触头,虽然合闸速度较快,但触头在合闸过程中会发生弹跳现象。根据 GB 50150—2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》,真空断路器合闸弹跳时间应小于 2 ms。

在合闸弹跳过程中,由于断口间距较小,当断口间出现较高幅值的电压时,会发生击穿现象,导致电弧的产生。真空断路器具有很强的灭弧能力,会将触点间由触头弹跳引起的电弧切断。触头弹跳产生的过电压  $u_L$  表达式为:

$$u_L = L \frac{dI}{dt} \quad (6)$$

式中:

$L$ ——电弧电感;

$\frac{dI}{dt}$ ——电流变化率。

由式(6)可知,触头弹跳产生的过电压与电路中的储能元件产生的振荡过电压叠加,会导致过电压幅值进一步增大。

断路器电弧阻抗特性可由断口电容  $C$ 、电弧电感  $L$  及电弧电阻  $R$  的串联支路来模拟。其中, $C$  表示断路器断开时断口间电容, $R$  表示断路器动作时电弧通道的导电能力<sup>[11-12]</sup>。

在  $90^\circ$  相位合闸的基础上,考虑触头弹跳的情况,对合闸过程进行仿真,过电压波形如图 7 所示。

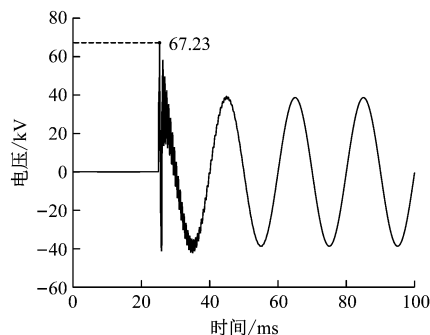


图 7 考虑触头弹跳时过电压波形

Fig. 7 Overvoltage waveform considering the contact bounces

由图 4 及图 7 可知:在  $90^\circ$  相位合闸时,考虑触头弹跳情况,操作过电压会在一瞬间达到峰值;之后截流过电压瞬间衰减,而振荡过电压相较于衰减较慢;两种过电压处于峰值时,相互叠加,相较于不

考虑弹跳情况,此时的过电压峰值增加 14 kV 左右。

### 3.5 极端工况下的操作过电压

断路器合闸时,动车组运行工况对过电压无影响,在网压相位  $90^\circ$  时进行合闸,选取单位分布电容为 10 nF/m 的高压电缆,接触网参数按照分相间距为 10 km 计算,考虑断路器弹跳的情况进行仿真分析,得到极端工况下的电压波形,如图 8 所示。

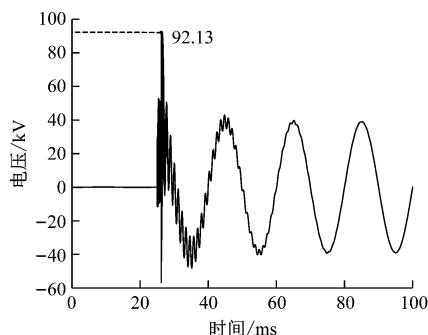


图 8 极端工况下过电压波形

Fig. 8 Overvoltage waveform under extreme conditions

极端工况下,当断路器合闸时,会产生峰值约为 92.13 kV 的对地过电压。根据《高速动车组整车试验规范》规定,动车组运行电压最大值为工频电压峰值的 2.4 倍。在极端工况下,电压峰值倍数接近该值,已经对动车组高压电气箱中设备的绝缘构成威胁。

## 4 结语

断路器合闸产生的暂态操作过电压会对动车组高压电器箱内设备构成安全隐患。本文对动车组主电路合闸过程进行简化,研究了影响合闸过电压的因素,并对极端工况下合闸过程进行仿真。结果表明,极端状态下过电压峰值为工频电压峰值的 2.39 倍,接近《高速动车组整车试验规范》规定的 2.40 倍,在极端工况下产生的过电压会对动车组高压设备的绝缘性能产生影响,甚至导致击穿现象。因此,需要采取相关措施进行防范,例如:采用相控合闸技术控制断路器在目标相位闭合,选择单位分布电容较小的高压电缆,改进真空断路器的机械特性,等等。上述措施可以有效降低动车组合闸过电压。

## 参考文献

[1] 张天浩,蒲宗礼,韩春刚,等. 城际动车组闭合断路器时操作过电压特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 81.

- ZHANG Tianhao, PU Zongli, HAN Chungang, et al. Switching overvoltage characteristics of intercity EMU when circuit breaker closing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 81.
- [2] 高国强,陈盼. 动车组操作过电压特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 62.
- GAO Guoqiang, CHEN Pan. Research on vehicle-mounted vacuum circuit breaker interrupting overvoltage[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 62.
- [3] 丁勇. 高速动车组车体操作过电压特性仿真分析与试验验证[J]. 中国铁路, 2017(9): 68.
- DING Yong. Simulation analysis & experimental verification of switching overvoltage characteristics of HS EMU car bodies[J]. China Railway, 2017(9): 68.
- [4] 高国强,万玉苏,刁超健,等. 高速动车组断路器操作过电压在车体的传播特性与影响机制[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 655.
- GAO Guoqiang, WAN Yusu, DIAO Chaojian, et al. Propagation characteristics and influence mechanism of vacuum circuit breaker switching overvoltage on high-speed electric multiple unit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 655.
- [5] 杨军. 高速动车组高压箱内异常放电故障分析及解决方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 133.
- YANG Jun. Analysis of abnormal discharge fault in high-voltage electric box and solutions[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(9): 133.
- [6] 刘孟恺. 电力机车过分相暂态过程分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- LIU Mengkai. Analysis of the transient process while locomotive passing phase insulator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [7] PHANIRAJ V, PHADKE A G. Modelling of circuit breakers in the Electromagnetic Transients Program[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 799.
- [8] KONDALA RAO B, GAJJAR G. Development and application of vacuum circuit breaker model in electromagnetic transient simulation[C] // IEEE. 2006 IEEE Power India Conference. New Delhi, India. New York: IEEE, 2006: 7.
- [9] 刘东来. 高速动车组接地技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- LIU Donglai. Study on grounding technology of high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [10] 王忆蕊. 高速动车组运行工况对车体回流的影响机制[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- WANG Yiting. The influence mechanism of high-speed EMU traction return current for operation conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [11] 张照辉,魏钢,杨庆,等. 12 kV 真空断路器投切并联电抗器合闸预击穿过电压的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 1.

(下转第 94 页)

地适应公交化运营的要求。由此可见,该优化方案是可行的。

## 5 结语

在国家层面、地区层面及运营主体层面,轨道交通一体化运营理念应运而生。一体化车站功能空间是在轨道交通一体化运营理念下的具体研究,符合新时代轨道交通趋势。从乘客服务、车站管理等交通功能性需求,向城市功能融合、交通配套、增值服务等弹性发展需求转变,通过对车站功能空间布局一体化理念的研究,得出以下结论:

1) 轨道交通一体化车站功能空间布局宜结合所在地政策、规划等条件,为城市弹性发展需求预留必要的一体化工程条件。

2) 一体化车站功能空间布局原则是基于一体化运营管理条件下提出的,尚需结合行车组织、客流需求、建设时序等,开展针对性的研究。

3) 针对同期建设和非同期建设的换乘车站,提出不同的功能空间布局原则。

本文的归纳研究可对后续一体化运营条件下车站的空间功能优化提供指引和帮助。

## 参考文献

[1] 谭彬. 都市圈区域轨道交通一体化运营问题与对策:以粤港澳大湾区为例[J]. 综合运输, 2022, 44(8): 143.

TAN Bin. Problems and countermeasures of integrated operation of

regional rail system in metropolitan area—an example of Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area[J]. China Transportation Review, 2022, 44(8): 143.

[2] 江南. 城市轨道交通一体化运营组织相关问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

JIANG Nan. Study on related problems about integrated operation organization of urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[3] 王修华. 多层次轨道交通互联互通研究[J]. 铁道勘察, 2022, 48(3): 22.

WANG Xiuhua. Research on interconnection of multi-level rail transit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(3): 22.

[4] 李桂桂. 市域铁路与城市轨道交通一体化运营体系相关问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

LI Guigui. Study on the integrative transit system relative issue of urban railway and urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[5] 胡叙洪. 区域轨道交通四维度规划理念研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(10): 1.

HU Xuhong. Research on the planning concept of four dimensions of regional rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(10): 1.

· 收稿日期:2023-06-25 修回日期:2024-01-24 出版日期:2024-06-10

Received:2023-06-25 Revised:2024-01-24 Published:2024-06-10

· 作者:秦竞卓,工程师,qinjingzhuo@vip.qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 89 页)

ZHANG Zhaohui, WEI Gang, YANG Qing, et al. Study of pre-strike overvoltage caused by 12 kV vacuum circuit breaker switching shunt reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 1.

[12] 安昌萍,司马文霞,廖瑞金,等. 35 kV 真空断路器开断空载变压器时过电压的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 99.

AN Changping, SIMA Wenxia, LIAO Ruijin, et al. Research on 35kv circuitry vacuum circuit breaker interrupting no load trans-

former overvoltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 99.

· 收稿日期:2023-08-04 修回日期:2023-10-23 出版日期:2024-06-10

Received:2023-08-04 Revised:2023-10-23 Published:2024-06-10

· 通信作者:张明锐,教授,zmr@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license