

DOI: 10.7667/PSPC151366

基于 ATP-EMTP 的计及高架桥高速铁路 过分相电磁暂态研究

宋小翠, 刘志刚, 王英

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 鉴于高速铁路牵引供电系统的线路大量铺设于高架桥上, 尝试考虑高架桥桥墩回路与牵引网间的电气耦合对高速列车过分相电磁暂态影响的研究, 对行进中的高速列车运行安全具有重要的意义。首先建立了牵引供电回路及高架桥桥墩回路的等效模型。其次重点分析和求取了高架桥桥墩耦合系数和各个电气参数。最后利用 ATP-EMTP 搭建高速列车过分相各暂态过程的车-网-桥耦合集中参数模型。仿真对比分析了计及高架桥和无高架桥高速列车过分相中的电磁暂态过程及其影响因素。仿真结果和对比分析表明, 高架桥回路为过分相的高频暂态分量提供有效泄流通道, 明显降低了高速列车弓头过电压幅值。

关键词: 高速铁路; 高架桥; 自动过分相; ATP-EMTP; 过电压

Study on electromagnetic transient process in split-phase insulator considering viaduct's electrical coupling based on ATP-EMTP

SONG Xiaocui, LIU Zhigang, WANG Ying

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Considering viaduct pier and traction network's electrical coupling, this paper focuses on the study of electromagnetic transient effect for electric multiple unit (EMU) passing split-phase insulator, which has important significant to the operation safety of EMU, since the traction lines of HSR (high-speed railway) power traction system are mostly laid on viaduct. Firstly, equivalent circuit model including traction power supply circuit and viaduct pier loop circuit is established. Secondly, this paper analyzes and solves the coupling coefficient of viaduct pier and various electrical parameters. Thirdly, the vehicle-catenary-viaduct coupling lumped parameter model regarding each transient process for EMU passing split-phase insulator is built by ATP-EMTP. Finally, the corresponding electromagnetic transient processes, which respectively consider viaduct or not, are simulated, and their influencing factors are analyzed in detail. The simulation results indicate that the viaduct looped circuit provides with effective discharge channel to weaken the over-voltage amplitude obviously.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1434203, No. U1134205 and No. 51377136).

Key words: high-speed railway; viaduct; automatic phase separation; ATP-EMTP; over-voltage

0 引言

高速铁路的牵引供电系统通过接触网实现高速列车的单相供电。为改善三相不平衡供电, 接触网多采用分相分段供电方式^[1], 电分相结构是电气化

铁道接触网实现相-相间电气隔离的重要途径^[2]。随着列车的大功率、高速化发展, 高速铁路自动过分相技术已暴露出新的电磁暂态问题。由于动车组过车载自动断电过分相中主断路器处于断开状态, 高速列车过分相电磁暂态直接使受电弓弓头产生严重过电压, 威胁行车安全。

高速列车过分相期间, 接触网、动车组、中性段三者之间不断进行电气连接与分断^[3], 牵引网拓

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目 (U1434203, U1134205); 国家自然科学基金 (51377136)

扑结构瞬时变化, 弓网拉弧时常发生^[4-5], 过分相产生的过电压现象已引起国内外学者重视。对此, 国内外均进行了相应的理论分析和仿真测试。国外学者主要从改变分相装置, 削弱电弧方面进行试验^[6]; 而国内则进行了更详细的研究。从解决方法上考虑, 文献[7]基于车载自动过分相技术仿真研究不同控制策略下平稳通过电分相, 防止过电流冲击; 文献[1, 8]分别提出变频移相技术消除电分相环节的供电死区, 以及设计以 FPGA 为核心的同相牵引供电系统取消“电分相”角度考虑, 实现“无电分相”目的。理论上, 文献[9-10]将线路各元件等效为 L-R-C 等组成的高阶电路, 提出列车过分相过电压是由高阶振荡电路回路产生; 文献[11-15]将高速列车过分相划分为不同暂态过程, 并建立各个过程等效电气模型, 仿真分析了高速列车过分相过电压; 文献[16]运用线性理论分析方法验证了不计及高架桥的高速列车过分相等效电路模型, 理论上研究了过分相电磁暂态过程。

我国高速铁路发展过程中形成自己的特点, 即以桥代路, 国内比例平均高达 50%^[17]。目前, 已有研究大都仅限于无高架桥的简单集中参数线路建模, 不计及实际线路高架桥上运行时的过分相过电压, 这对实际线路的过分相分析有一定的局限性。因此, 本文重点考虑高架桥回路电气耦合, 建立计及高架桥的高速铁路过分相各个暂态过程车-网-桥耦合模型, 利用 ATP-EMTP 电磁暂态软件对比有无高架桥情况下动车组受电弓弓头过电压差异, 同时分析其他参数变化对过电压影响, 对高速列车过分相电磁暂态问题进行研究。

1 计及高架桥高速铁路过分相分析

高速列车高架桥上断电过关节式电分相过程中, 受电弓与接触网频繁发生接触与分离, 线路拓扑结构瞬变, 受电弓弓头会出现暂态过电压。

图 1 为计及高架桥的高速铁路过分相示意图。高速列车在进入电分相区域时, 首先需要断开车载主断路器, 切断列车主电气回路, 防止过分相过程中产生的过电压侵入车体损坏电气设备。此时, 牵引电气回路主要负载包括: 牵引网线路的阻抗、车顶高压互感器等值阻抗、车顶高压电缆的分布电容等。列车在过 A、B 相供电臂之间的分相区时, 经历“有电-无电-有电”的过程, 期间会出现四次暂态过电压, 如图 1 中 1、2、3、4 位置处, 具体过程如下。

(1) 与中性线跨接: 列车从 A 相供电臂运行到位置 1 处时, 受电弓同时跨接中性线, 中性线上的

感应电压与接触网电压瞬间叠加并同时进入车顶产生第一次暂态过电压, 此过程相当于将中性段负载接入牵引供电回路的电路中。

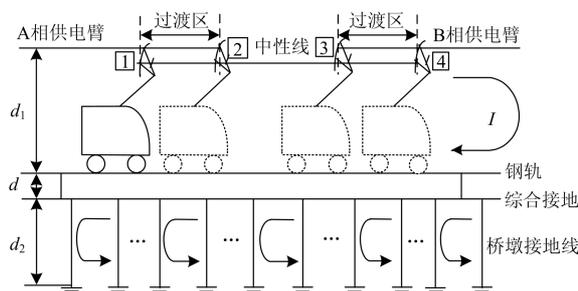


图 1 高速铁路高架桥上过分相示意图

Fig. 1 Diagram of EMU passing split-phase insulator on viaduct

(2) 与供电臂分离: 受电弓滑过过渡区到位置 2, 与 A 相供电臂瞬间分离。此过程相当于切除电源, 由于线路中存在储能元件, 能量在线路的电阻、电感和电容元件中振荡形成第二次暂态过电压。

(3) 与供电臂跨接: 列车依靠惯性滑过中性段区域, 到达位置 3, 受电弓连接 B 相供电臂, 相当于电源再次接入电路, 电源电压与中性段感应电压再次瞬间叠加形成第三次暂态过电压, 此过程再次将供电臂电源接入电气回路中。

(4) 与中性线分离: 受电弓到位置 4, 瞬间与中性线分离, 实现 B 相供电臂换相供电的转换, 线路中切除中性段, 线路拓扑再次变化形成第四次暂态过电压, 此过程后, 中性段负载被切除, 高速动车组将成为牵引供电回路的主要负载。

四个暂态过程中, 过程一、过程二之间距离小, 间隔时间特别短, 同理过程三、过程四, 因此仅观测到两次明显的暂态过电压, 但四个过程线路拓扑均不同, 因此需要分别进行分析。

2 高架桥上过分相等效建模

高架桥桥墩之间、综合接地线以及大地形成电气回路, 牵引网回路与桥墩回路之间存在电气耦合。因此, 高速铁路过分相模型不仅要考虑整个牵引网-列车-综合接地回路, 还要考虑桥墩回路。高架桥上高速铁路过分相车-网耦合集中参数模型如图 2 所示。

高架桥上建模主要包括两相供电臂, 中性段和动车组三部分。根据线路工况, 七跨锚段关节式电分相长约为 320 m, 两相邻变电所之间的距离约为 50~60 km, 而两 AT 所之间为 25~30 km, 电磁波在相邻变电所之间传播需要 2×10^{-4} s, 远小于一个工频周期, 因此将牵引网均按集中参数模型选取, 接

触网导线采用π等值电路模型^[18]。

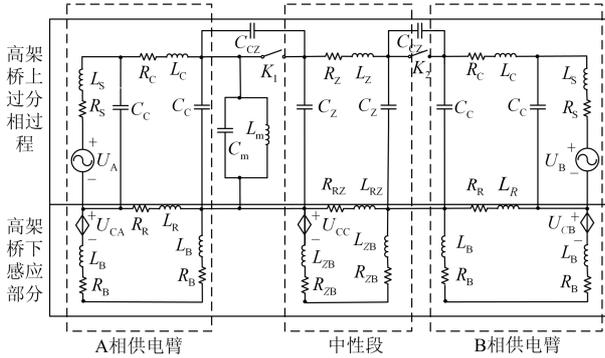


图 2 计及高架桥的高速列车过分相车-网-桥耦合模型

Fig. 2 Vehicle-catenary-viaduct coupling model for EMU passing split-phase region considering viaduct

高架桥下桥墩之间构成多个网孔，桥梁的钢筋与综合接地线连接在一起，桥下部分两个网孔又共用一个桥墩。相邻桥墩、综合地线、大地形成闭合回路。该回路与桥上接触线供电回路间存在电气耦合，在回路中形成电流，同一回路中的两个桥墩电流大小相等、方向相反，相邻网孔桥墩上的电流相互抵消，因此可以将分相区段下的多个网孔等效为一个大的网孔，如图 3 所示。

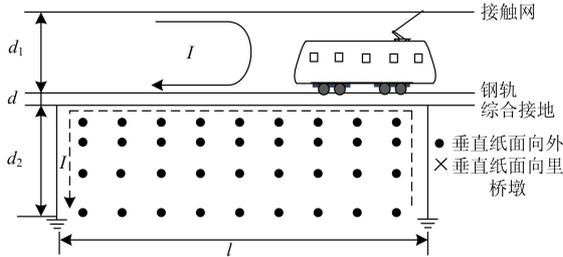


图 3 高架桥桥墩磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of viaduct pier

根据电磁场理论，将接触网与钢轨等效为无限长直导线，桥墩磁场分布如图 3 所示。高架桥桥墩回路中的总的磁通量可以表示为

$$\Phi = \int_d^{d+d_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot l \cdot dr - \int_{d+d_1}^{d+d_1+d_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot l \cdot dr = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \left(\ln \frac{d+d_2}{d} - \ln \frac{d+d_1+d_2}{d+d_1} \right) \quad (1)$$

供电回路与桥墩回路的互感耦合系数为

$$M = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{d_2+d}{d} - \ln \frac{d_1+d+d_2}{d+d_2} \right) \quad (2)$$

式中： I 为牵引供电回路电流； d_1 为接触线导高，取 6 m； d 为钢轨和综合地线之间的距离，取 $d=0.3$ m； d_2 为桥墩平均高度，取 7 m； l 为高架桥

上所对应的线路长度。A、B 两相供电臂长度取 25 km，中性段长度取 320 m，过渡区长度取 95 m，可以得到：供电臂下接触网回路与桥墩回路互感 $M_A=M_B=12.25$ mH，中性段下的耦合互感 M_Z 为 0.156 mH。

根据法拉第定律，在桥墩回路中产生的感应电动势为

$$E = -M \cdot \frac{dI}{dt} = j\omega MI \quad (3)$$

高架桥下供电臂与中性段在桥墩回路中感应电压可由等效受控源表示，分别为 $U_{CA} = j\omega M_A I$ ，

$$U_{CB} = j\omega M_B I, \quad U_{CC} = j\omega M_Z I$$

两相供电臂牵引电压源 U_A 和 U_B 分别为 $U_A = 27.5\sqrt{2} \cos \varphi_A$ ， $U_B = 27.5\sqrt{2} \cos \varphi_B$ ， φ_A 和 φ_B 为供电臂初始相角，相角差取 60° 。本文的仿真研究针对京津高速铁路，其中，牵引变压器采用 Ynd11 型，接触线型号为 CTMH150 型，中性线型号为 JTMH120 型；文中以运行于该线路的 CRH2-300 型动车组为研究对象，该列车车顶高压互感型号为 TBY1-25 型，据此计算得到牵引变电所，供电臂接触网，中性线和动车组相关参数 R_S 、 L_S 、 R_C 、 L_C 、 C_C 、 R_Z 、 L_Z 、 C_Z 、 L_m 。考虑到车顶高压互感器对车体结构电容相对于车顶高压电缆的结构电容可忽略不计，动车组车顶等值电容主要由车顶高压电缆结构电容所决定，根据车顶高压电缆总长度约 100 m，求出 C_m ；单条钢轨(P65 型)有效电阻和电感分别为 $0.135 \Omega/\text{km}$ 、 $3.560 \text{ mH}/\text{km}$ ，综合地线等效电阻和电感为 $0.135 \Omega/\text{km}$ 、 $3.040 \text{ mH}/\text{km}$ ^[12]，结合具体线路长度求得 R_R 、 L_R 、 R_{RZ} 、 L_{RZ} 。对于高架桥下等值电路参数，高架桥桥墩平均间距约为 32 m，根据高速铁路暂行规定，桥墩接地电阻和接地电感不得超过 1Ω 和 0.0078 mH ，故分别取单个桥墩电阻、电感为 $R=0.5 \Omega$ 和 $L=0.0038 \text{ mH}$ 。设等效为大网孔后的接地电阻、电感分别为 R_0 、 L_0 ，根据能量守恒得到

$$\frac{(j\omega MI)^2}{R+R} \cdot n = \frac{(nj\omega MI)^2}{R_0+R_0} \quad (4)$$

式中： n 为桥墩个数； $R_0 = n \cdot R$ ，同理 $L_0 = n \cdot L$ ，计算得到 R_B 、 L_B 、 R_{ZB} 、 L_{ZB} 。

各参数值如表 1 所示，部分参数选取及参数计算方法参考文献[12, 19-21]。

3 高架桥电气耦合仿真与分析

基于图 2 建立的高速铁路自动过分相车-网-桥耦合模型，本文利用 ATP-EMTP 电磁暂态软件，同时考虑有无高架桥两种情况，对各个独立暂态过程

及过分相全过程暂态情况进行仿真分析。

表 1 高速列车过分相车-网耦合模型参数表

Table 1 Parameter of vehicle-catenary coupling parameter

参数名称	参数值
牵引变电所等值电阻 R_S	0.165 Ω
牵引变电所等值电感 L_S	10.8 mH
供电臂等值电阻 R_C	4.45 Ω
供电臂等值电感 L_C	35.7 mH
供电臂对地等值电容 C_C	0.134 2 μF
中性线等值电阻 R_Z	0.010 6 Ω
中性线等值电感 L_Z	0.086 mH
中性线对地等值电容 C_Z	1.878 63 μF
中性线与供电臂间耦合电容 C_{CZ}	1.15 nF
动车组车顶等值电感 L_m	99 522 mH
动车组车顶等值电容 C_m	0.032 μF
供电臂钢轨与综合地线并联等值电阻 R_R	1.4 Ω
供电臂钢轨与综合地线并联等值电感 L_R	28 mH
中性段钢轨与综合地线并联等值电阻 R_{RZ}	0.017 9 Ω
中性段钢轨与综合地线并联等值电感 L_{RZ}	0.358 4 mH
供电臂段桥墩引下线的接地电阻 R_B	195 Ω
供电臂段桥墩引下线的接地电感 L_B	3 mH
中性段桥墩引下线的接地电阻 R_{ZB}	2.5 Ω
中性段桥墩引下线的接地电感 L_{ZB}	0.019 mH

3.1 暂态过程一

建立高速列车过分相暂态过程一仿真电路, 如图4所示。A相供电臂桥墩回路电流控制电压源由受控源及测流元件共同组成, 通过设置F元件输出电压表达式, 由受控电压源U配合完成桥墩回路感应电压设置。其中, F元件表达式为

$$OUT = ia \cdot \omega \cdot M_A \cdot ASIN(1) \quad (5)$$

式中, $ASIN(1)$ 为复变量 j , 代入相应数值即可。同理设置 B 相供电臂及中性段受控电压源。

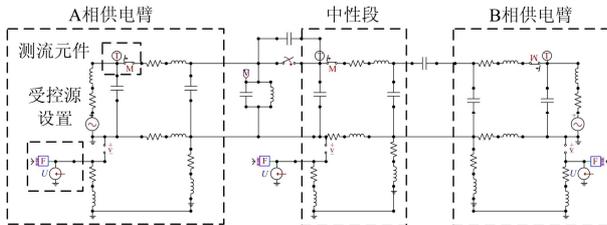
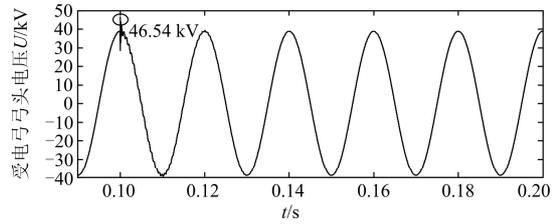


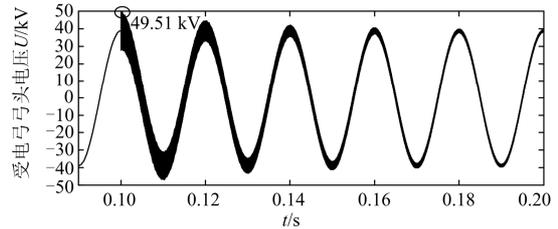
图 4 基于 ATP-EMTP 的计及高架桥过分相过程一模型

Fig. 4 Model of the transient process 1 for EMU passing electrical split-phase on viaduct by ATP-EMTP

开关闭合时刻即暂态一发生时刻设置为 0.1 s, A、B 两相供电臂初始相位分别设置为 0° 和 60° , 模拟暂态一中列车开始同时跨接接触线和中性段的瞬间。同理, 去掉桥墩回路模型, 分别得到计及高架桥和无高架桥暂态过程一仿真波形如图 5 所示。



(a) 计及高架桥弓头电压仿真波形



(b) 无高架桥弓头电压仿真波形

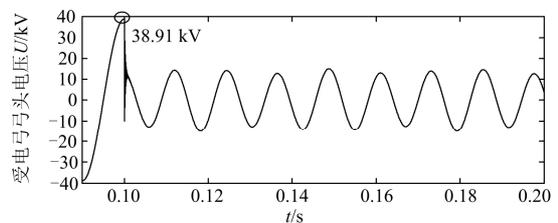
图 5 基于 ATP-EMTP 的暂态过程一仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform for transient process 1 based on ATP-EMTP

由图 5 可知, 计及高架桥暂态过程一的受电弓弓头过电压幅值约为 46.6 kV, 约为工频电压幅值的 1.2 倍, 受电弓弓头电压除了工频分量外, 还出现了高频暂态分量, 但高频暂态电压在不到半个周期的时间内就衰减, 仅维持几毫秒。而在不考虑桥梁耦合下, 弓头电压中高频暂态分量接近 5 个周期后才被抑制, 受电弓过电压幅值约为 49.6 kV, 约为工频电压幅值的 1.3 倍。高架桥的耦合作用使过电压降低了 6%。由于开关闭合瞬间相当于中性段瞬接入电源, 中性段的耦合电压在车顶分布电容与牵引网等效电容、电感形成回路中多次振荡, 产生高频电压分量, 损坏设备^[22], 但由于线路中有电阻性参数及高架桥回路的泄流作用, 高频振荡很快被抑制。

3.2 暂态过程二

暂态过程二相当于受电弓脱离接触网瞬间, 弓头电压恢复为中性段感应电压(约为 11 kV)过程中出现暂态过电压。类似于暂态过程一仿真模型设置, 将过程二中动车组模型连接于中性段左侧, 开关断开, 利用 ATP-EMTP 分别对有无高架桥情况仿真, 弓头电压波形如图 6 所示。



(a) 计及高架桥弓头电压仿真波形

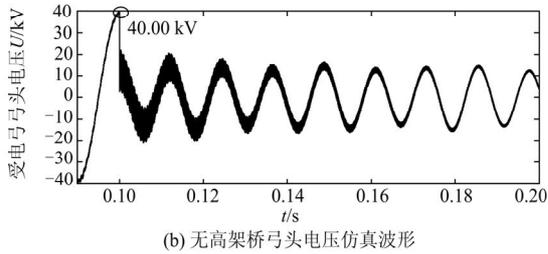


图 6 基于ATP-EMTP的暂态过程二仿真波形
Fig. 6 Simulation waveform for transient process 2 based on ATP-EMTP

对比图6中两波形，受桥梁影响，受电弓弓头高频电压分量持续将近4个周期，电压幅值为40 kV，桥墩耦合使得过电压幅值降低了2.8%。与图5对比，暂态过程二的过电压幅值并不明显，可以忽略。此外，此过程桥墩回路有明显抑制作用。

3.3 暂态过程三

暂态过程三是受电弓连接B相供电臂，供电臂电压重新叠加于只有中性段电压的受电弓上，再次产生明显暂态过电压。过程三的仿真电路中，A相供电臂与中性段间存在耦合电容，中性段左侧开关断开。动车组模型连接中性段右侧，动车组在0.1 s(右侧开关闭合时刻)开始同时跨接中性段和右侧供电臂。仿真得到两种情况下弓头电压波形如图7所示。

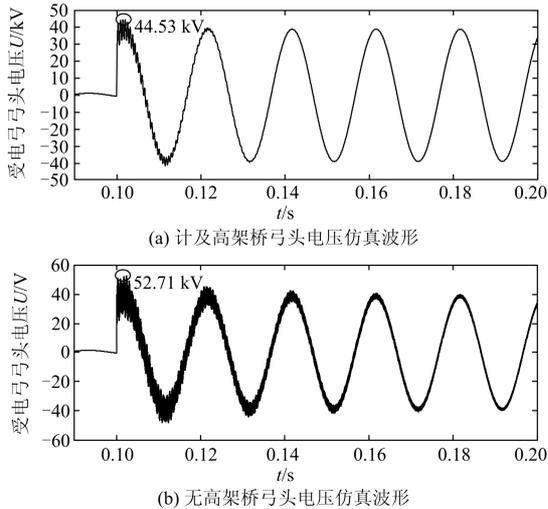


图 7 基于ATP-EMTP的暂态过程三仿真波形
Fig. 7 Simulation waveform for transient process 3 based on ATP-EMTP

图7可以明显看到无高架桥时高频振荡分量在经历3~4个周期后才基本衰减，且暂态过电压幅值达到53 kV，比计及高架桥时受电弓弓头过电压高了18%。此过程桥墩的耦合有明显的泄放和抑制作用。

3.4 暂态过程四

暂态过程四中中性段被切除瞬间，对整个负荷影响很小。此过程完成B相换相供电。同理，动车组模型应与B相供电臂左侧连接，开关断开。仿真波形如图8所示。

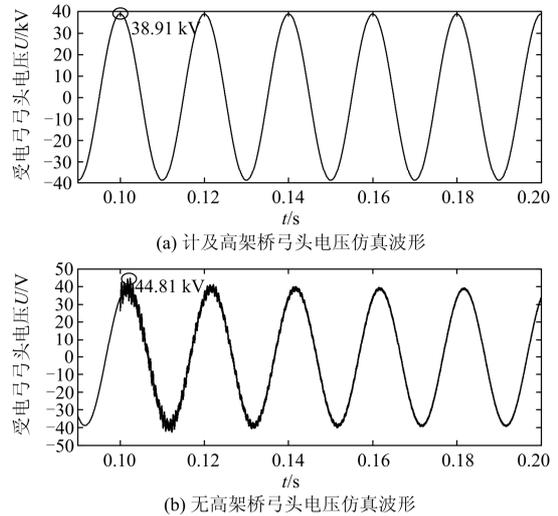


图 8 基于ATP-EMTP的暂态过程四仿真波形
Fig. 8 Simulation waveform for transient process 4 based on ATP-EMTP

由图8知，计及高架桥的受电弓弓头电压变化并不大，基本无暂态过电压，波形可看为标准的正弦波形，但无高架桥的暂态过程较明显，桥墩作用下，过电压降低15%。

综上所述，高架桥对高速铁路过分相过电压暂态过程有泄流、降压的作用。

3.5 列车过分相全过程弓头过电压仿真分析

高速列车过分相是一个连续、快速的过程，为了完整反映列车过分相全过程的电磁暂态、对比高架桥影响，图9为基于ATP-EMTP建立过分相全过程模型。

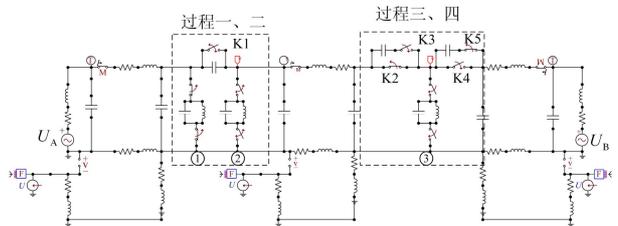


图 9 基于ATP-EMTP计及高架桥的高速列车过分相全过程模型

Fig. 9 Model for the whole process of EMU passing electrical split-phase regarding viaduct based on ATP-EMTP

图9利用ATP-EMTP中开关设置及列车位置相配合，选取11个开关，动车组模型两端分别由两个

开关时间配合确定列车位置。过程一到过程二, 开关 K1 先闭合再打开, 期间列车模型由位置 1 变换到位置 2 变化, 其他开关 K2、K5 闭合, K3、K4 打开; 过程二到过程三, 动车组由位置 2 变换到位置 3, 控开关 K4 闭合 K5 断开, 其他开关保持不变; 过程四其他开关状态均不变, K2 断开瞬间 K3 闭合, 各个开关时间紧密连接, 即可仿真计及高架桥的列车过分相全过程。同理, 无高架桥过分相全过程仿真电路如图 10 所示。

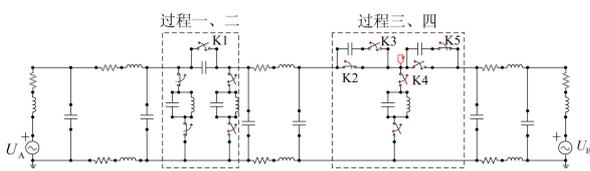


图 10 基于 ATP-EMTP 无高架桥的高速列车过分相全过程模型

Fig. 10 Model for the whole process of EMU passing electrical split-phase without viaduct based on ATP-EMTP

按照七跨锚段关节式电分相长 320 m、CRH2 型动车组 200 km/h 速度计算, 各个暂态瞬间分别发生于: 0.4 s、2.21 s、4.45 s、6.26 s 时刻。取仿真全长时间为 7 s, 按上述各个过程发生时间设置, 得到计及高架桥和无高架桥的弓头过电压波形分别如图 11(a)和图 11(b)所示。

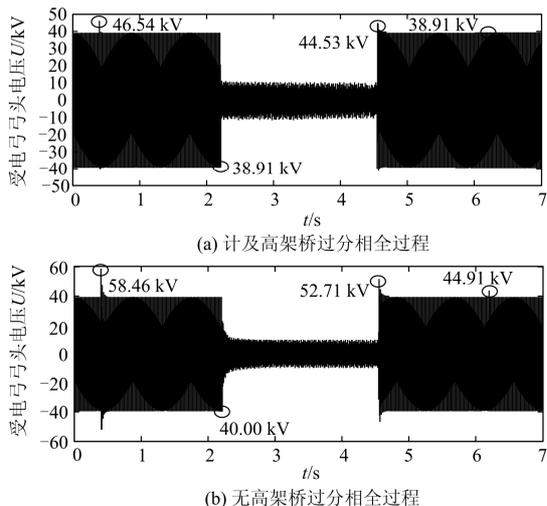


图 11 基于 ATP-EMTP 的高速列车过分相全过程仿真
Fig. 11 Simulation on the whole process of EMU passing electrical split-phase based on ATP-EMTP

图 11(b)无高架桥仿真结果与文献[2]不计及高架桥的地面自动开关过分相实测波形对比, 即可正确反映实际过分相暂态过程。此外, 图 11 对比了计及高架桥耦合作用与无高架桥耦合时过分相过电压

波形, 可以看出: 桥墩回路可以有效改善高速列车过分相的暂态过电压。

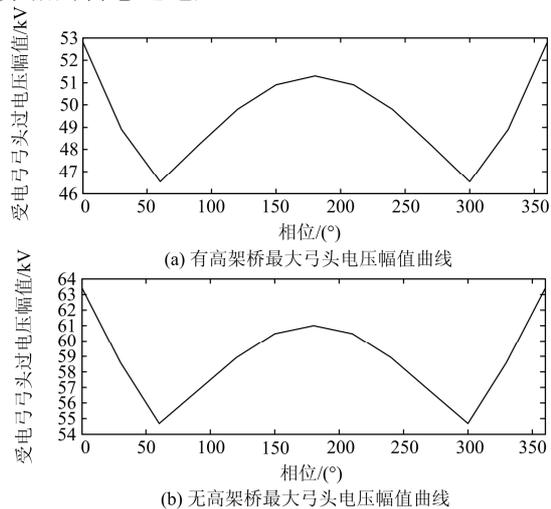


图 12 受电弓最大弓头过电压与两相供电臂相角差关系曲线

Fig. 12 Relation curve of maximum pantograph over-voltage and phase angle differences of feeding section

φ_A 保持 0° , 改变 B 相供电臂相位, 得到计及高架桥和无高架桥下不同相位差对应的动车组过分相中最大暂态过电压幅值, 从而拟合出供电臂相角对高速列车过分相过电压幅值的影响曲线, 分别如图 12(a)和图 12(b)所示。

由图 12 可以看出桥墩回路的降压作用, 且供电臂相位差也会影响列车过分相弓头电压。列车过分相最大暂态过电压在 180° 达到最大, 且在 60° 或 300° 左右达到最小。仿真中也发现: 供电臂相角差越小, 过程三暂态过电压幅值更高, 而相角差在 180° 左右, 过程一更高。因此, 考虑到我国高速铁路实际常见的两相供电臂相位差, 相角差选为 60° 可以在一定程度上降低列车过分相中过电压的危害。

4 结论

本文建立了高架桥耦合作用下高速列车过分相的车-网-桥耦合的理论模型, 并利用 ATP-EMTP 电磁暂态软件对列车过分相的各个暂态过程进行仿真分析, 同时研究不同供电臂相角差对过分相过电压的影响。结合全文仿真波形, 可以得到如下结论:

- (1) 高速列车过分相的四个暂态过程中, 过程一、三比过程二、四的过电压幅值更高, 高频暂态分量更凸出, 过程二、四的过电压很不明显, 基本可以忽略;
- (2) 高架桥的耦合作用使得各个暂态过程的过

电压峰值明显降低,且高频暂态分量很快被抑制;

(3) 列车过分相瞬间,暂态过电压受供电臂初始相角、受电弓弓头接触线路时刻、供电臂相位差等影响。选择合适的供电臂相角可以改善过分相暂态过电压。

本文研究从理论上验证了高架桥对高速列车过分相过电压的泄放和抑制作用,可为解决实际高速列车过分相的电磁暂态问题提供了一定借鉴,也为我国高速列车运行安全提供一定参考。在此基础上,本文下一步计划开展桥梁以及隧道过分相的实地测量,以验证高架桥模型及其参数的正确性。

参考文献

- [1] 田旭, 姜齐荣, 魏应冬. 电气化铁路无断电过分相方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 14-18.
TIAN Xu, JIANG Qirong, WEI Yingdong. Research on novel uninterruptible phase-separation passing scheme in electrified railways[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 14-18.
- [2] 冉望, 李雄, 刘冰, 等. 地面自动过分相中开关切换的瞬态过程研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 150-154.
RAN Wang, LI Xiong, LIU Bing, et al. Research on transient process of ground's auto-passing neutral section at switching time[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 150-154.
- [3] 郭凤仪, 王喜利, 王智勇, 等. 弓网离线接触电流总谐波畸变率的实验研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 261-266.
GUO Fengyi, WANG Xili, WANG Zhiyong, et al. Experimental research on total harmonic distortion of contact current caused by pantograph-catenary off-line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 261-266.
- [4] 王英, 刘志刚, 高仕斌, 等. 弓网电弧模型及其电气特性的研究进展[J]. 铁道学报, 2013, 35(8): 35-43.
WANG Ying, LIU Zhigang, GAO Shibin, et al. Review of research development of pantograph-catenary arc model and electrical characteristics[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(8): 35-43.
- [5] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [6] FINKELSTEIN I, AXELROD A, JOFFE E B. Switching-off phenomena in an LCR network[C] // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999, 1: 549-553.
- [7] 李官军, 冯晓云, 王利军, 等. 高速动车组自动过分相控制策略研究与仿真[J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 181-185.
LI Guanjun, FENG Xiaoyun, WANG Lijun, et al. Research and simulation on auto-passing phase separation control strategy of high-speed EMU[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 181-185.
- [8] 邱大强, 李群湛, 舒泽亮, 等. 基于FPGA的综合潮流控制器的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 163-167.
QIU Daqiang, LI Qunzhan, SHU Zeliang, et al. Design and realization of integrated power flow controller based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 163-167.
- [9] 宫衍圣. 电力机车过关节式电分相过电压研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(4): 103-107.
GONG Yansheng. Research of over-voltages of electric locomotive passing the articulated phase insulator[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(4): 103-107.
- [10] 陆清照. 动车组不分闸自动过分相暂态过电压及抑制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
LU Qingzhao. Research of transient over-voltage suppression technique for EMU auto-passing the neutral section with on-board switch closed[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [11] XIONG L, TRILLION Q Z, WANG R, et al. Research of over-voltage of electric locomotive passing the articulated phase insulator[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012: 1-4.
- [12] 高国强. 高速列车运行状态暂态过电压机理与抑制方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
GAO Guoqiang. Study on the over-voltage mechanism and suppressing method for high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [13] FAN Fuqiang, LIU Zhigang, WANG Ying, et al. Research and analysis of transient process of locomotive passing neutral section based on habedank src model[C] // 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT), 2013: 233-241.
- [14] 许龙, 崔艳龙, 魏建忠, 等. 动车组不分闸过分相时牵引变压器差动保护误动分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 105-108, 113.
XU Long, CUI Yanlong, WEI Jianzhong, et al. Misoperation of traction transformer differential protection when train

- passes phase-separation with electrical load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 105-108, 113.
- [15] QU Zhijian, LIU Mingguang, GUO Liang, et al. Transient processes time series analysis of high-speed railway power traction and over-voltage protection[C] // 2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2012: 818-821.
- [16] 姜晓锋, 何正友, 胡海涛, 等. 高速铁路过分相电磁暂态过程分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 30-36.
JIANG Xiaofeng, HE Zhengyou, HU Haitao, et al. Analysis on electromagnetic transient process of electric multiple unit passing neutral section devices[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 30-36.
- [17] 罗建斌, 杨志刚. 高架桥声屏障高度对高速列车气动特性影响[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(3): 6-10.
LUO Jianbin, YANG Zhigang. Effect of viaduct noise barrier height on aerodynamic characteristics of high-speed train[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(3), 6-10.
- [18] 张杨, 刘志刚. 基于电磁暂态分析的高速铁路牵引网谐波模型及谐波特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 70-75.
ZHANG Yang, LIU Zhigang. Modeling and characteristics analysis of harmonic in high-speed railway traction network based on PSCAD/EMTDC platform[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 70-75.
- [19] 王晓茹, 高仕斌. 电力系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 12-28.
- [20] 李琼林, 刘书铭, 余晓鹏, 等. 300km/h系列高速客运专线对电网电能质量的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 79-83.
- LI Qionglin, LIU Shuming, YU Xiaopeng, et al. Study on the impact of the 300 km/h series high-speed special railway on the grid power quality[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 79-83.
- [21] 李夏青, 王奎鹏. 直流牵引供电网暂态电路模型与参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 168-172.
LI Xiaqing, WANG Kuijuan. Analysis of transient equivalent circuit model and parameters on DC traction power supply network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 168-172.
- [22] 王斌, 姜晓锋, 黄文, 等. 高速铁路车网耦合下的谐波潮流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 15-23.
WANG Bin, JIANG Xiaofeng, HUANG Wen, et al. Harmonic load-flow approach based on train-catenary coupling system of high-speed railway[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 15-23.

收稿日期: 2015-08-05; 修回日期: 2015-09-21

作者简介:

宋小翠(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为电气化铁路车-网耦合过电压; E-mail: 13183857890@163.com

刘志刚(1975-), 男, 教授, 博导, 主要研究领域为信号处理与计算智能及在电力系统及轨道交通中的应用;

王英(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究领域为信号处理在电力系统中的应用及其弓网电弧研究。

(编辑 周金梅)