DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.021

高速铁路弓网离线在线识别及应对策略

刘　洋[1,2]，李水昌[1,2]，王永翔[1,2]，殷振环[1,2]，马　驰[1,2]，程　龙[1,2]
（1.中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所，北京 100081；
2.北京纵横机电科技有限公司，北京 100094）

摘　要：电气化铁路车辆运行过程中，受电弓与接触网之间的短暂分离（即弓网离线）易引发过电流问题，产生安全隐患、影响铁路运营秩序。文章基于既有动车组牵引电传动系统，介绍其主电路结构及网侧整流器的控制方法，分析弓网离线对系统的影响，着重研究弓网离线后恢复接触时产生过电流问题的原因，提出弓网离线在线快速识别及应对策略。文章搭建了包含电弧模型的牵引电传动系统全数字实时仿真模型，首先通过与实测波形对比证明模型的准确性，然后基于该模型验证文中提出的弓网离线在线识别及应对策略。

关键词：高速铁路；弓网离线；牵引系统；电弧；四象限；高速动车组

中图分类号：U292.91+4；U225.3　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000-128X（2024）02-0171-07

0　引言

近年来，我国高速铁路电气化建设快速发展[1]，截至2023年底，我国电气化铁路营业里程突破15.9万km，高速铁路营业里程超过4.5万km，均居世界第一。在电气化铁路牵引供电系统中，电力机车或动车组依靠车顶受电弓获取接触网中的电能。列车运行过程中，由于接触网和受电弓弓头的振动，或者接触网导线上分相绝缘器、电连接线夹、接触线接头夹及覆冰等硬点冲击因素，受电弓滑板与接触网导线在滑动接触受流时会产生分离（即弓网离线），并形成电弧。

在弓网电弧对车载牵引变流器产生影响方面，文献[2]建立Cassie-Mayr混合电弧模型，并搭建了电弧试验装置修正电弧模型，最后应用该电弧模型，从电压、电流两方面研究弓网燃弧对网侧整流器输入交流电流、输出直流电压的影响。文献[3]建立了分析弓网离线过程中逆变器直流侧电压和电机转矩变化的数学模型，初步分析了不同车速下发生弓网离线后的转矩变化规律，并得到了转矩维持时间和下降时间随车速变化的规律。在弓网电弧在线识别方面，文献[4]提出一种基于回路电流和支持向量机的弓网电弧在线识别方法及其工程实现方案。采用改进的F-score算法选择回路电流的平均值、标准差和相关系数作为弓网电弧的典型特征，利用svmtrain函数创建SVM模型，利用网格搜索算法优化SVM的径向基核函数。从牵引变流器角度对弓网离线的应对措施方面，文献[5]将弓网离线归类为一种网压中断现象，并且网压中断后网压差异并不明显，通过电压检测方法不能满足快速性及区分度要求，并进一步提出基于有功电流判断和基于锁相环相角变化判断两种方法。文献[6]提出了根据网压瞬时峰值和牵引变压器一次侧电流共同判定网压中断的方法，同时按照离线时间将弓网离线分为不同情况，分别采用不同的保护措施，降低了动车组运行故障率。

国内某型高速动车组在载客运行期间多次遇到弓网离线、电弧放电现象，严重时引起网侧整流器过电流、造成动车组停车故障，影响动车组正常运营秩序。本文从弓网电弧对车载牵引变流器影响的角度，着重研究弓网电弧熄灭并重新恢复接触时产生过电流的原因，提出弓网离线在线识别方法及应对策略。

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(J2022J004)；中国铁道科学研究院集团有限公司重点项目(2023YJ018)
通信作者：王永翔，男，博士，研究员，主要从事牵引传动技术研究；E-mail: wangyongxiang@zemt.cn
引用格式：刘洋, 李水昌, 王永翔, 等. 高速铁路弓网离线在线识别及应对策略[J]. 机车电传动, 2024(2): 171-177.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.021.
Citation：LIU Yang, LI Shuichang, WANG Yongxiang, et al. Identification and response strategy for pantograph-catenary contact loss in high-speed railway[J]. Electric drive for locomotives,2024(2): 171-177.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.02.021.

1 牵引电传动系统简介

1.1 主电路结构

图1所示为动车组牵引电传动系统主电路结构，主电路主要由受电弓、主断路器、牵引变压器、牵引变流器、牵引电机构成。

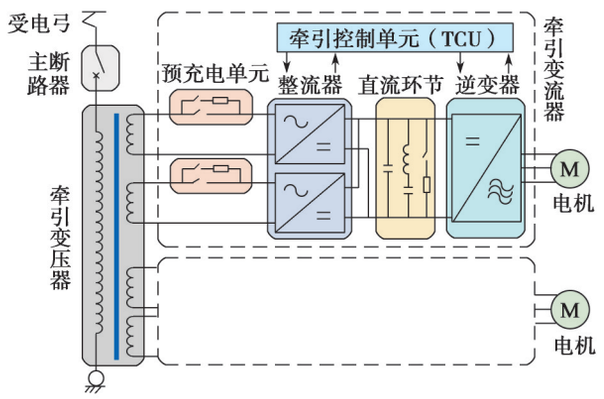


图1 牵引电传动系统主电路结构图

Fig. 1 Main circuit structure of electric traction drive system

受电弓与牵引网接触取电，电流经牵引变压器一次侧绕组后，从车轮、钢轨接地回流；牵引变压器将接触网高压变换为合适电压，通过多个独立的二次侧绕组供给牵引变流器；牵引变流器将单相交流电进行交–直–交变换后，向牵引电机提供三相变压变频电源，驱动动车组车轮运行。

牵引变流器主要由预充电单元、整流器、直流环节、逆变器、牵引控制单元组成。每台牵引变流器包含两重整流单元，分别从两个独立的二次侧绕组取电，其直流输出并联；预充电单元为直流环节的电容缓慢充电，避免合闸瞬间电容电压过冲，并且两重预充电单元互为冗余、可独立工作；直流环节包含支撑电容、LC二次滤波支路、斩波泄放支路等；牵引变流器各部件的工作状态由牵引控制单元（TCU）统一控制。

1.2 整流器控制方法

网侧整流器将已经降低幅值的交流侧网压变换为适合后级逆变器运行的直流电压，同时在交流侧实现单位功率因数运行。因此通常采用基于同步旋转坐标系的控制方法，通过虚拟出一个与单相系统实际交流量正交的交流量，采用坐标旋转变换得到同步坐标系下的直流量，对其进行独立调节即可实现有功功率、无功功率的解耦控制。控制结构上通常采用直流电压外环加上交流电流内环的双闭环串级控制结构。

图2为网侧整流器控制框图。TCU采集网压u_n，通过锁相计算得到网压幅值U_{nm}、角频率ω、相位角度θ；采集直流电压u_{dc}，采用PI控制器控制其跟随指令u_{dc}^*，控制器输出作为d轴有功电流内环的指令i_d^*，为实现单位功率因数，q轴无功电流的指令i_q^*通常为0；采集整流器交流电流（即牵引变压器二次侧电流）i_s，并虚拟出与i_s（即i_a）正交的电流i_b，通过坐标旋转变换得到同步坐标系下的直流量i_d、i_q，通过PI控制器分别调节d、q轴电流，结合网压幅值前馈、交流侧电阻R_s、电感L_s（通常为牵引变压器漏阻抗）反馈解耦，最终得到控制信号u_s^*，经脉宽调制生成整流器所需的PWM脉冲。

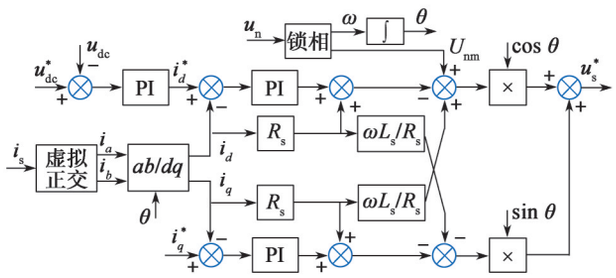


图2 整流器控制框图

Fig. 2 Block diagram of rectifier control

2 弓网燃弧影响分析

弓网离线瞬间，在高电压的作用下，受电弓滑板和接触网导线之间的气隙被击穿，发生气体放电，形成电弧，列车的受流并没有立即中断；随后弓网离线距离进一步加大，电弧吸收的能量不足以维持继续燃烧，或者列车电流过零点等因素，电弧会熄灭（弓网离线），且电弧熄灭的时刻具有随机性[7]。

2.1 电弧模型

在电弧的宏观研究中，认为电弧是一个可变电阻，其值是由电弧中输入的能量与散出的能量共同决定的，可用非线性微分方程式来描述[8]。Cassie电弧模型为

$$\frac{1}{g}\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\ln g}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{u^2}{U_c^2}-1\right) \tag{1}$$

式中：g为电弧电导；u为电弧电压；τ为电弧时间常数，代表电弧的存储能量与散出能量的比值，根据不同的情况，τ的取值范围为10^{-6}~10^{-4} s；U_c为电弧电压梯度常数。

设i为电弧电流，则有$i=ug$，代入上式可变化为

$$g\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{i^2}{U_c^2}-g^2\right)=\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}g^2}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

令$x=g^2$，则有

$$\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{i^2}{U_c^2}-x\right) \tag{3}$$

经拉氏变换得

$$sX(s)=\frac{2}{\tau}\left[\frac{I(s)^2}{U_c^2}-X(s)\right] \tag{4}$$

令 $s=\dfrac{1-z^{-1}}{T_s}$，T_s为离散系统控制周期，将式(4)离散化得

$$\left(\frac{1}{T_s}+\frac{2}{\tau}\right)X(k)=\frac{2I(k)^2}{\tau U_c^2}+\frac{1}{T_s}X(k-1) \tag{5}$$

另有

$$U(k)=\frac{I(k)}{\sqrt{X(k)}} \tag{6}$$

式(5)、式(6)为离散化电弧模型，模型输入为电弧电流$I(k)$，输出为电弧电压$U(k)$。

2.2　弓网离线影响分析

弓网离线(电弧熄灭)与随后弓网再次恢复接触的过程，相当于一个主断路器的分合闸过程，合闸瞬间，网压加在牵引变压器一次侧产生励磁磁通，叠加变压器内既有磁通，因二者相位不一致，以及铁心磁通的饱和与铁材料的非线性特性等因素，可能会产生很大的励磁电流，即产生励磁涌流现象[9-10]。

某动车组牵引变流器因弓网离线引发故障的波形如图3所示。

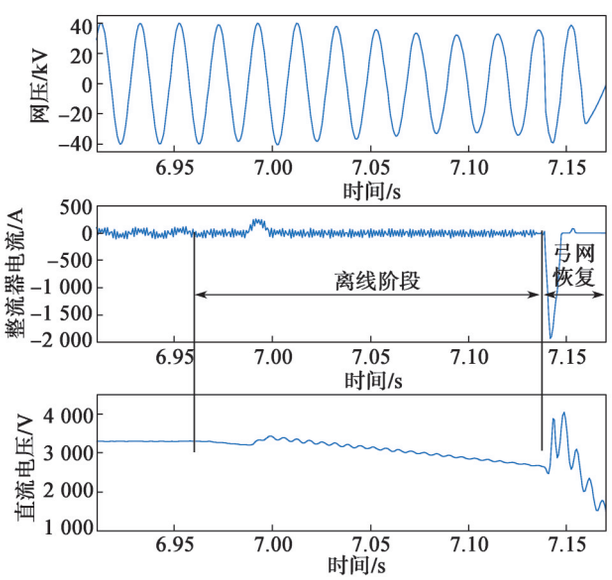


图3　弓网离线引发故障波形

Fig. 3　Fault waveform due to pantograph-catenary contact loss

由图3可知，整个过程分为弓网离线阶段（电弧熄灭）和恢复阶段，具体如下：

弓网离线阶段牵引网与受电弓脱开而无法传递能量，整流器依然运行，交流电流i_s突降至0附近（图3中电流波动代表此处弓网瞬时恢复又再次离线）；由于后级逆变器和牵引电机仍在工作，因此直流环节支撑电容放电以提供能量，表现为直流环节电压持续下降；注意到此时的网压信号为整流器脉宽调制输出交流电压感应到牵引变压器一次侧的值，并且该值略有降低。

在弓网恢复阶段可以看到，在弓网之间恢复接触前，感应到牵引变压器一次侧电压的幅值、相位已经偏离网压，图4为弓网良好接触、离线阶段简化电路模型。图4中U_n为网压，将牵引变压器简化等效为理想变压器与漏阻抗的结合，E_p、E_s分别为牵引变压器一次侧、二次侧电动势，忽略一次侧漏阻抗，Z_s为二次侧漏阻抗，I_s为二次侧电流也即整流器输入电流，U_{ab}为整流器交流电压。

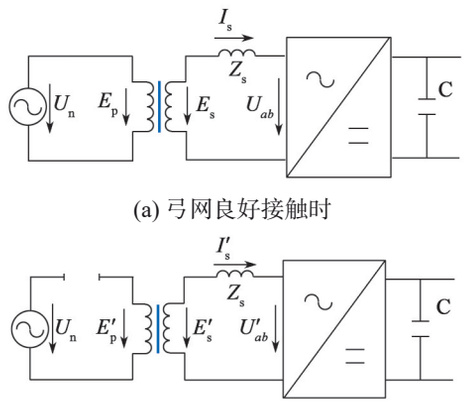


图4　牵引主电路简化模型

Fig. 4　Simplified model of traction main circuit

在弓网良好接触阶段，如图4(a)所示，忽略牵引变压器一次侧漏阻抗，则有：

$$\left.\begin{aligned}U_n&=E_p\\E_p&=nE_s\\E_s&=I_sZ_s+U_{ab}\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中：n为牵引变压器变比。

在弓网离线阶段，如图4(b)所示，有：

$$\left.\begin{aligned}E'_p&=nE'_s\\E'_s&=I'_sZ_s+U'_{ab}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

U_{ab}是参考电压u_s^*经PWM调制产生的整流器交流电压，由图2控制框图可推导出式(9)。

$$u_s^*=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U_{nm}-PI_{id}-R_si_d+\omega L_si_q\\-PI_{iq}-R_si_q-\omega L_si_d\end{bmatrix} \tag{9}$$

由于离线阶段直流电压偏离指令值并持续下降，因此直流电压PI控制输出即d轴电流内环指令值持续增加，但i_s突降至0，所以d轴电流PI控制量PI_{id}以及漏阻抗前馈解耦项均发生变化，进而控制信号u_s^*、整流器交流电压U_{ab}也发生变化，导致牵引变压器一次侧感应电压E'_p与网压U_n幅值、相位发生偏离，在弓网恢复接触瞬间牵引变压器易发生励磁涌流，即i_s出现过流，同时导致直流环节电压波动。

2.3　在线识别及应对策略

列车运行过程中，弓网燃弧熄灭后又恢复容易导致车辆过流等故障，影响运营秩序，需研究应对策略。如果在弓网离线阶段，封锁整流器脉冲，由于牵引变压器内部剩磁的存在，一次侧感应电压E_p在弓网离线–恢复暂态时间内不会改变，可有效避免弓网恢复时的电流冲击。因此如何在线快速识别弓网离线状态成为关键。

根据以上分析，弓网离线有两个明显的特征：

①整流器输入电流突降为0附近；

②直流环节电压持续偏离设定值。

由图2可知，若直流环节电压持续偏离设定值，则d轴电流设定值将持续增大/减小，但i_s恒接近0，根据整流器设定与实际电流等效差值ΔI_s，并结合当前逆变器功率P_m、直流电压偏差ΔU_{dc}，可判断弓网离线状态，流程如图5所示，X_1、X_2、X_3、X_4、X_5结合现场数据确定，其中

$$\left.\begin{aligned}\Delta I_s &= i_d^* \cos\theta - i_s \\ \Delta U_{dc} &= u_{dc}^* - u_{dc}\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

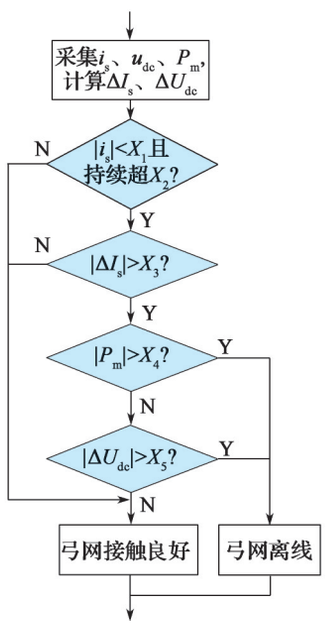


图5 弓网离线应对策略控制流程

Fig. 5 Control flow of response strategy for pantograph-catenary contact loss

诊断出弓网离线后，立即封锁整流器、逆变器PWM脉冲，同时整流器控制程序初始化直流电压PI控制器、dq轴电流PI控制器，待网压、直流环节电压恢复正常后，且使直流环节电压指令值跟随当前直流电压实际值，避免使能PWM脉冲瞬间的冲击，随后启动整流器、逆变器，整个系统恢复正常运行。

3 仿真分析

3.1 全数字实时混合仿真模型

本文在RT-LAB平台上搭建动车组牵引电传动系统全数字实时仿真模型，如图6所示，模型包括CPU模型与FPGA模型两部分。CPU模型包括SC_GUI和SM_CTRL 2个子系统，前者用于人机交互，后者用于实现牵引变流器控制算法，以及配置电力硬件解算器eHS。FPGA模型用于牵引变流器电气模型的高速实现。

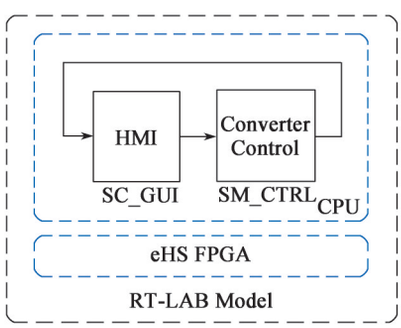


图6 RT-LAB总体仿真模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of overall RT-LAB simulation model

牵引变流器部分电气回路如图7所示，弓网电弧模型串联接入牵引变压器一次侧回路，4套二次侧绕组向2台变流器供电，2台变流器控制上完全相同。

仿真主要参数如表1所示。

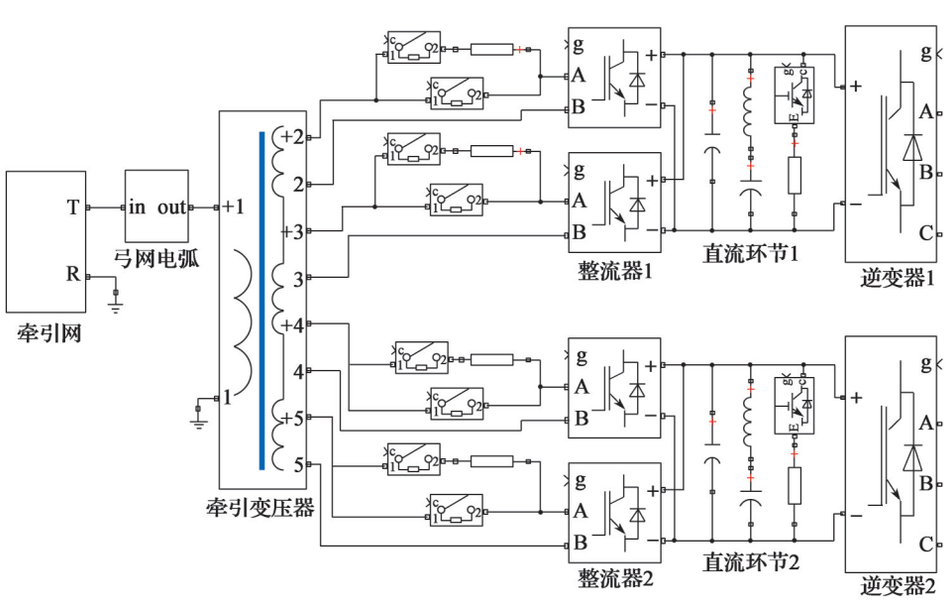


图7 牵引变流器部分电气回路模型

Fig. 7 Electric circuit model of traction converter

表 1　仿真参数

Table 1　Simulation parameters

主电路参数	参数值
网压/V_{rms}	27 500
直流环节电压/V	3 300
变流器功率/kW	150
牵引变压器变比	25000:1900

3.2　弓网燃弧影响

弓网电弧模型如图 8 所示，发生弓网拉弧时在电气上将电弧等效为一可变电阻，弓网良好接触时采用线路电阻 R_{nom} 模拟，采用可控电压源模拟电阻特性，并通过模块切换模拟弓网拉弧（离线）–恢复状态。

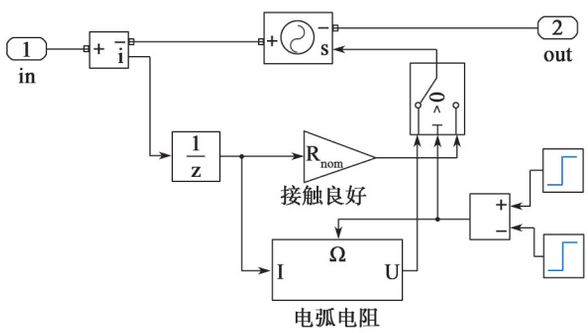


图 8　弓网电弧子模型

Fig. 8　Pantograph-catenary arc submodel

图 8 中，电弧电阻模型依据式(5)、式(6)搭建，根据相关经验设置燃弧时间为 300 ms，电弧时间常数 τ=1.2e–5 s，电弧电压梯度常数 U_c=1500L_{arc}，L_{arc} 为电弧长度，仿真中从 0 线性增至 5 cm，为求解微分方程，设定电弧初始电导值为 100 S。

电弧电压、电流仿真结果如图 9 所示。从图 9 可以看到，燃弧过程中电弧电压不超过 200 V。

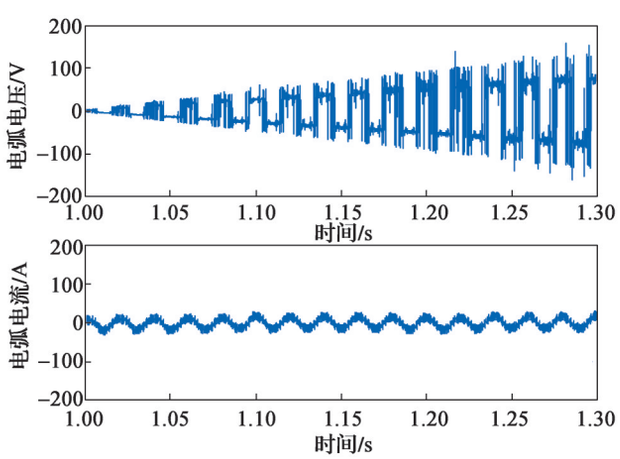


图 9　电弧电压和电流波形

Fig. 9　Arc voltage and current waveform

燃弧过程中牵引变流器相关波形如图 10 所示。从图 10 可以看出，整流器电流、直流环节电压保持平稳，可知弓网燃弧对牵引变流器影响较小。

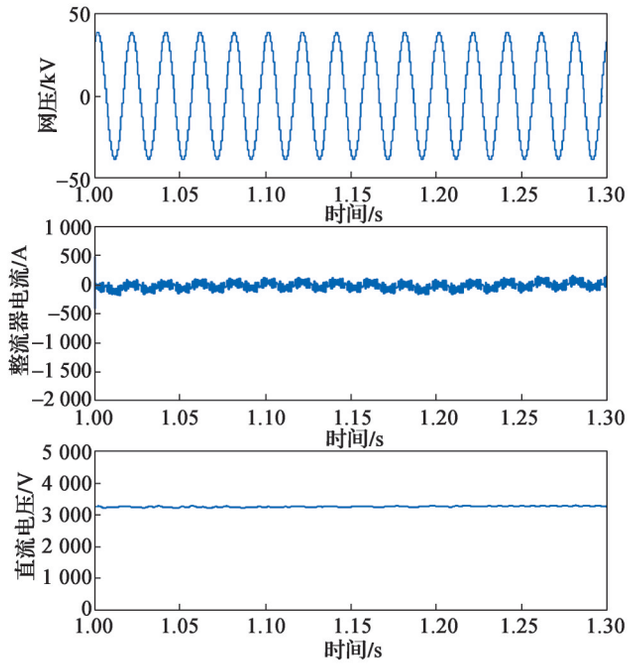


图 10　燃弧过程中变流器有关参数波形

Fig. 10　Waveform of relevant converter parameters during arcing

3.3　弓网离线励磁涌流影响

仿真中从 1.3 s 开始电弧熄灭（弓网离线），1.4 s 弓网恢复接触，仿真结果如图 11 所示。从图 11 可以看到，弓网离线后，整流器电流突降至 0 附近，直流电压持续下降，牵引变压器一次侧电压幅值、相位逐渐偏离网压，导致弓网恢复接触瞬间整流器电流产生较大冲击，同时直流电压相应存在大幅波动，与实车故障数据基本一致。

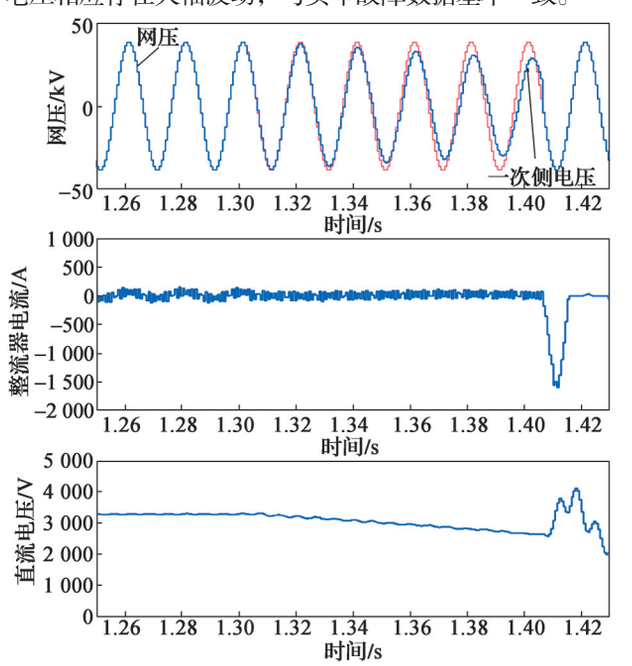


图 11　离线过程中变流器有关参数波形

Fig. 11　Converter relevant parameters waveform during contact loss

3.4　在线识别及应对策略仿真

针对弓网离线的应对策略仿真波形如图 12 所示，

仿真中 1.30 s 开始电弧熄灭（弓网离线），1.35 s TCU 识别到弓网离线状态并封锁整流器、逆变器，由于实车变流器存在风机、水泵等负载，因此仿真模拟中直流电压持续下降，当低于一定值时整流器工作于不控整流模式；在 1.46 s 左右整流器重新激活，直流电压按设定斜率上升至目标值，整个系统恢复正常运行。

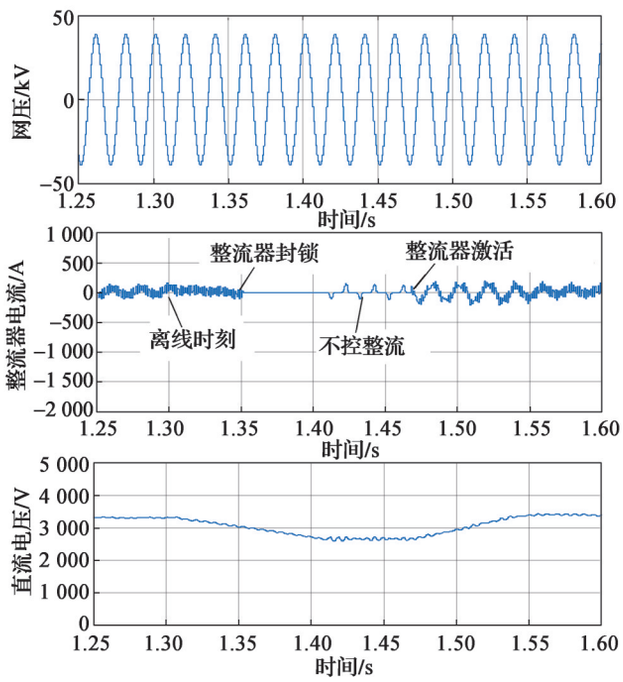


图 12　弓网离线应对措施参数仿真波形

Fig. 12　Parameters simulation waveform of response strategy for pantograph-catenary contact loss

4　结论

本文通过理论分析及仿真验证，得出以下结论：

①弓网电弧持续燃烧过程中，电弧电压相对较小，其对牵引变流器运行的影响较小。

②发生弓网离线（电弧熄灭）后，网侧整流器交流电压发生变化，导致牵引变压器一次侧感应电压与网压幅值、相位均发生偏离，在弓网恢复接触瞬间牵引变压器易发生励磁涌流，造成牵引系统过流、过压问题。

③本文提出的弓网离线在线识别及应对策略，可准确识别弓网离线状态，有效抑制过流、过压问题，并可快速、平稳恢复系统运行。

参考文献：

[1] 中国国家铁路集团有限公司工电部. 铁路接触网[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.
China National Railway Group Co., Ltd., Industrial and Electrical Department. Railway contact network[M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2022.

[2] LIN Fei, WANG Xiaofan, YANG Zhongping, et al. Analysis of electrical characteristics of the four-quadrant converter in high speed train considering pantograph-catenary arcing[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2017, 231(2): 185-197.

[3] 王赛, 杨中平, 林飞. 弓网离线对高速列车牵引电机输出转矩的影响研究[C]//中国高校电力电子与电力传动学术年会组织委员会. 第七届中国高校电力电子与电力传动学术年会论文集. 上海: 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 2013: 198-205.
WANG Sai, YANG Zhongping, LIN Fei. Research on the influence of pantograph-catenary offline on the output torque of high speed train traction motor[C]//Organizational Committee of the Academic Annual Conference on Power Electronics and Power Transmission in Chinese Universities. Proceedings of the 7th Academic Annual Conference on Power Electronics and Power Transmission in Chinese Universities. Shanghai: Key Laboratory of Power Transmission and Power Conversion Control of Shanghai Jiao Tong University, Ministry of Education, 2013: 198-205.

[4] 王智勇, 郭凤仪, 冯晓丽, 等. 基于电流信号特征的弓网电弧识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 82-91.
WANG Zhiyong, GUO Fengyi, FENG Xiaoli, et al. Recognition method of pantograph arc based on current signal characteristics[J]. Transactions of china electrotechnical society, 2018, 33(1): 82-91.

[5] 张钢, 郭尝君, 郝峰杰, 等. 动车组网压中断快速检测及应对策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊2): 770-778.
ZHANG Gang, GUO Changjun, HAO Fengjie, et al. The rapid detection and countermeasures for network voltage interruption in electric multiple units[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2019, 34(Suppl 2): 770-778.

[6] 沈泓, 陈东, 付刚. 高速动车组网压中断检测及优化措施研究[J]. 机车电传动, 2020(5): 153-156.
SHEN Hong, CHEN Dong, FU Gang. Research on detection and optimization measures of high-speed EMU power network voltage interruption[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 153-156.

[7] 王波. 弓网电弧对车载变压器的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
WANG Bo. Research on the influence of pantograph-catenary arc on traction transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[8] 黄昌萍. 弓网离线对高速列车的影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
HUANG Changping. Effect of contact loss between the pantogragh and catenary on the high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[9] 王瑾. 弓网离线时牵引变压器直流偏磁及其抑制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
WANG Jin. Research on DC magnetic bias and suppressing

method of traction transformer during disconnection of pantograph-catenary system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[10] 张婷婷. 高速列车弓网电弧的特性及其对牵引传动系统的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHANG Tingting. Characteristic of pantograph arcing for the high-speed train and its influence on traction drive system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

Identification and response strategy for pantograph-catenary contact loss in high-speed railway

LIU Yang[1,2], LI Shuichang[1,2], WANG Yongxiang[1,2], YIN Zhenhuan[1,2], MA Chi[1,2], CHENG Long[1,2]

(1. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Transient disconnection between pantographs and catenaries during train operation on electrified railways, known as pantograph-catenary contact loss, can cause issues like over-current, creating safety hazards and consequential disruptions to operational order. This paper introduces the main circuit structure and control method of grid-side rectifiers of the prevailing traction electric drive systems for EMU. The analysis investigated the system impacts of pantograph-catenary contact loss, emphasizing the reasons for over-current occurrences during contact recovery, leading to the establishment of a rapid online identification method and a response strategy. Following developing a full-digital real-time simulation model of the electric drive systems for traction, which includes an arc model, accuracy verification was conducted firstly through waveform comparisons with actual measurements. This model was subsequently used to verify the proposed identification method and response strategy for pantograph-catenary contact loss.

Keywords: high-speed railway; pantograph-catenary contact loss; traction system; arc; four-quadrant; high-speed EMU

收稿日期：2023-11-27；修回日期：2024-03-01