

一种长大下坡路段高速铁路再生制动能量的分析方法

章叶心¹, 邓云川², 刘志刚¹, 张雨婷¹, 陈涛¹, 黄可¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 电化院, 四川 成都 610031)

摘要: 高速动车组在通过长大下坡路段时, 需进行限速来确保列车的运行安全, 而在此过程中产生的再生制动能量会被返送至牵引网, 并可能对供电安全造成威胁。目前利用牵引网-动车组耦合模型分析再生制动能量的研究较少, 故以CRH3型动车组为例, 提出了一种精细的分析方法。首先, 基于详细的牵引网-动车组系统等值电路进行建模, 通过动车组限速分析、受力分析, 计算出动车组通过长大下坡路段时产生的再生制动功率大小。然后, 通过拟合制动功率与转子转速的函数关系, 对模型目标指令参数进行求解, 仿真出不同线路条件下动车组中间直流电压及牵引网压, 并对供电安全进行了评估。通过对比仿真结果和成渝线的实测结果, 证明该建模方法的正确性, 且较已有研究更符合实际。本研究可为山区铁路的设计提供参考。

关键词: 再生制动过程; 牵引供电系统; 高速铁路; 长大下坡道; 车-网模型仿真计算

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22859

An Analysis Method for Regenerative Braking Energy of High-speed Railway Under Long Downslope Route

ZHANG Yexin¹, DENG Yunchuan², LIU Zhigang¹, ZHANG Yuting¹, CHEN Tao¹, HUANG Ke¹

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University,

Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Electrical Design Institute,

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: When the high-speed electric multiple units (EMUs) pass through the long downslope route, speed limit is required to meet the safety of train operation, the regenerative braking energy generated in this process is returned to the traction network and may threaten the safety of power supply. At present, there are few studies on regenerative braking energy by accurate vehicle-grid integrated models. Therefore, taking CRH3-type EMUs as an example, a detailed analysis method was proposed. Firstly, based on the detailed equivalent circuit of vehicle-grid system, a model was established, and through the speed limitation analysis and force analysis of EMUs, the regenerative braking power of EMUs for passing long downslope routes was calculated. Then, by fitting the function between braking power and rotor speed, the instruction parameters of the model were solved, the rectifier voltage and catenary voltage of EMUs under different line conditions were simulated to estimate the safety of power supply. By comparing the simulation results and the experimental testing results at Chinese Cheng-Yu railway line, the correctness of the modeling method was verified, and it is more practical than the existing research. This study can provide reference for the design of mountain railways.

Key words: regeneration braking process; traction power supply system; high-speed railway; long downslope route; vehicle-grid model simulation

随着西部大开发的实施, 我国大量规划建设渝利铁路、成兰铁路、川藏铁路等复杂山区铁路。

其中川藏铁路所经地区地形高差极大, 因此设置长大坡度的线路是难以避免的^[1]。目前我国动车

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1434203); 中铁二院科研项目(KYY2020033(20-21), KYY2020132(20-22))

作者简介: 章叶心(1997—), 女, 硕士研究生, Email: yexinz@foxmail.com

组制动方式均优先采用再生制动,动车组通过长大下坡路段时所需再生制动力大且制动时间长,会向电力系统返送大量的再生制动能量^[2],所以研究高速动车组在长大下坡路段的再生制动过程是很有必要的。

国内外很多学者通过对牵引供电系统和高速动车组进行建模仿真^[3-8]来研究高速铁路中返送的再生制动能量的影响。对于牵引供电系统建模,文献[3]建立了单相 π 型等值电路模型,但模型没有详细考虑牵引网复杂的拓扑结构;文献[4]基于多传输导体理论,利用牵引网各元器件的节点导纳矩阵构建了精确的链式网络模型,但该多端口模型具有矩阵计算复杂、仿真速度低等限制;文献[5]以电力系统平行多导体传输理论为基础给出简化的牵引网多导线模型,对牵引网多端口模型进行了降阶处理。

对于高速动车组牵引传动系统建模,文献[6]建立了电流源及恒功率源等效模型,与动车组的实际情况差别较大,未反映再生制动的工作机理;文献[7]利用仿真软件对动车组的建模中仅搭建了整流器部分,未考虑逆变器-电机调速系统,无法模拟动车组在不同速度下的负载转矩和阻力情况;文献[8]仿真了整个动车组牵引传动系统,能反映各种运行条件下的情况,但未考虑牵引网系统对动车组运行过程中吸收或返送能量大小的影响。

这些研究成果,对牵引供电系统和动车组牵引传动系统的数学模型以及再生制动能量的产生机理做了较全面的阐述。但由于动车组在实际运行过程中,电能流动回路包括复杂牵引网、车顶高压电缆、车载变流器、车体、接地线、钢轨等多个部件,若忽略过多部件会影响电路拓扑结构,从而影响仿真结果的准确度。因此,目前对于高速动车组再生制动能量的研究存在两个方面的不足:1)已有的再生制动模型通常只针对局部电路进行研究,未将复杂牵引网结构、动车组接地部件与动车组牵引传动系统的整流器、逆变器及电机作为整体研究,且未能建立互耦合的仿真模型;2)已有的牵引网-动车组一体化等值电路模型较少考虑长大下坡路段的坡道参数影响,且并未给出制动功率与转子转速的函数对应关系。

鉴于此,本文以我国典型高速列车CRH3型动车组为例,建立了精细的牵引网-动车组耦合

电路模型(考虑了复杂牵引网、动车组牵引传动系统及动车组接地系统等部件),并详细考虑了坡道参数的影响。通过拟合制动功率与转子转速的函数关系,对模型目标指令参数进行求解,实现坡道参数与仿真模型的结合。在此基础上,针对不同线路条件下的动车组制动工况进行仿真,分析再生制动能量对牵引网-动车组系统电气特性的影响,并对其电压安全进行评估,以期线路前期设计提供参考。最后,结合成渝线棉丰-李家湾牵引变电所的实测数据,验证了仿真分析方法的正确性及实用性,并通过比对已有文献可知,本文提供的仿真结果与实际情况更为接近。

1 再生制动原理

再生制动是指高速动车组在减速运行过程中,牵引电动机转变为发电机,同时产生为高速动车组减速运行提供电制动力的制动力矩,并将多余的电能反馈回牵引网的过程^[9]。

高速动车组在制动工况下,能量流动过程与牵引工况相反,处于发电状态的牵引电机所产生的电能经逆变器整流为直流电,再经脉冲整流器逆变为交流电后反馈回牵引网,实现再生能量的回馈,如图1所示。

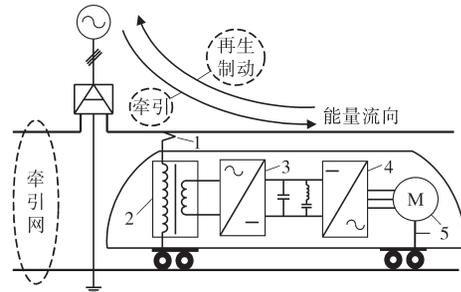


图1 高速动车组牵引传动系统能量流动示意图(1-受电弓,2-变压器,3-整流器,4-逆变器,5-电机)

Fig.1 Schematic of energy flow in traction drive system of high-speed EMUs (1-pantograph, 2-transformer, 3-converter, 4-inverter, 5-motor)

2 牵引网-动车组系统仿真模型的搭建

2.1 牵引供电系统模型

自耦变压器(auto-transformer, AT)供电方式的复线全并联牵引供电系统结构见图2,其中,牵引变电站主变压器的接线方式采用V/x接线,变比为220:27.5;T为接触网,R为钢轨线,F为馈线,P为保护线。

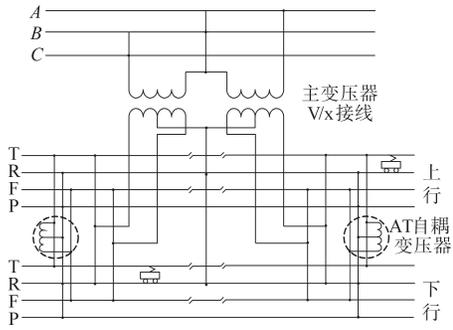


图2 AT供电方式复线全并联牵引供电系统结构

Fig.2 Electrical structure of full parallel traction power supply system under AT power supply mode

图2中,牵引网采用基于链式多导体传输理论的降阶建模方法^[6]。构建的链式网络模型由串联子网和并联支路组成,各串联子网中的平行多根传输导体间两两互容、互感,可用 π 型电路等效,如图3所示。

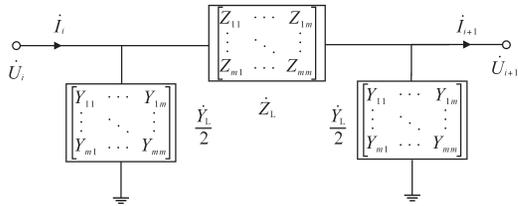


图3 牵引子网 π 型等效电路模型

Fig.3 The π -type equivalent circuit of traction subnet model

图3中, m 为牵引网平行传输导体的数目,设子网中各导体电压、电流分别为 $U(x), I(x)$;阻抗、导纳矩阵分别为 $Z(x), Y(x)$,可知牵引子网的稳态方程为

$$\begin{cases} \frac{dU(x)}{dx} = Z(x)I(x) \\ \frac{dI(x)}{dx} = Y(x)U(x) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 CRH3型动车组模型

CRH3型动车组的电气结构^[10]如图4所示,2号、7号车设有受电弓、车载变压器及工作接地装置,4号、5号车体设有保护接地。在车载变压器的二次侧设有4台变流装置,每台变流装置均包含2台两电平四象限脉冲整流器、1台主逆变器以及4台牵引电机。

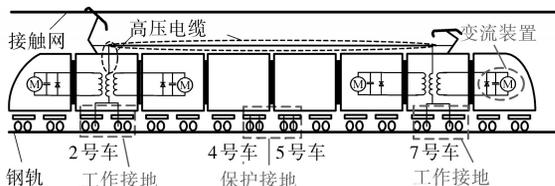


图4 CRH3型动车组电气结构示意图

Fig.4 Electrical structure of CRH3-type EMUs

图4中,脉冲整流器采用瞬态直接电流控制策略,控制原理如下^[11]:

$$\begin{cases} I_{N1} = K_p(U_d^* - U_d) + 1/T_i \int (U_d^* - U_d) dt \\ I_{N2} = I_d U_d / U_N \\ I_N^* = I_{N1} + I_{N2} \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - \omega L_N I_N^* \cos(\omega t) - G_2 [I_N^* \sin(\omega t) - i_N(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_p, T_i 为PI参数; U_d 为中间直流环节电压; U_d^* 为中间直流侧给定电压,按CRH3车型将其约束在2700~3600V之间; I_d 为中间直流环节电流; U_N 为网侧电压有效值1550V; I_N^* 为网侧电流给定值; $u_{ab}(t)$ 为网侧电压瞬时值; ω 为网侧电压角频率; L_N 为网侧等效电感; G_2 为比例放大系数; $i_N(t)$ 为网侧电流瞬时值。

牵引逆变器-异步电机系统采用SVPWM调制的电压型矢量控制策略^[11],其调速控制原理如图5所示。

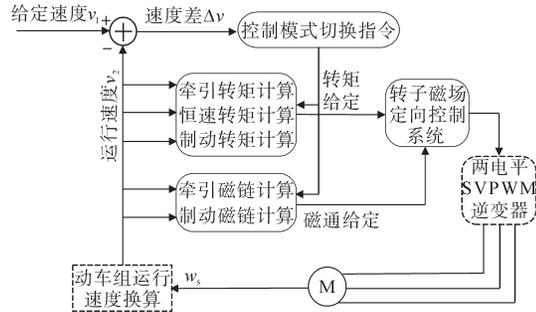


图5 调速控制系统原理框图

Fig.5 Schematic diagram of speed control system

根据三相异步电机的工作原理,可知转差率 s 与转子转速 n 、同步转速 n_1 关系如下:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3)$$

若控制电机使 $n > n_1$,则电机输出的转矩为负,牵引电机转为发电机状态,此时动车组向牵引网返回电能。因此,动车组模型可通过牵引电机调速系统实现制动工况。

2.3 牵引网-动车组系统模型

将牵引供电系统模块与CRH3型动车组模块按实际的电气耦合关系连接,建立如图6所示的牵引网-动车组系统模型,其中,动车组模块接入距牵引变电所15km的左供电臂上行线中。

在牵引网链式网络模型中,结合多导体传输线理论以及各导线的几何尺寸、空间位置,利用Carson公式^[4]以及静电场镜像法列写出阻抗矩阵和电位系数矩阵,对矩阵进行变换,从而确定导

体的感性及容性耦合参数^[5]。

对于CRH3型动车组模型,车顶高压电缆的线芯可等效为经验值的阻抗,且线芯与屏蔽层间存在容性耦合,可按π型电路等效;车体与接地装置等效为经验值的电阻;脉冲整流器、逆变器以及牵引电机封装为变流器模块,接在车载变压器的二次侧。根据文献[4-8,11],给出牵引网-动车组耦合模型电气参数,见表1。

表1 车-网耦合模型电气参数

Tab.1 Electrical parameters of vehicle-grid model			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
高压电缆电阻	0.014 mΩ/m	碳刷电阻	0.05 Ω
高压电缆电感	0.000 131 093 mH/m	支撑电容	9.01 mF
高压电缆电容	0.000 411 62 μF/m	电压比例参数	0.45
车体电阻	0.225 mΩ/m	电压积分参数	2.8
车体电感	0.001 103 375 mH/m	电流比例参数	0.65

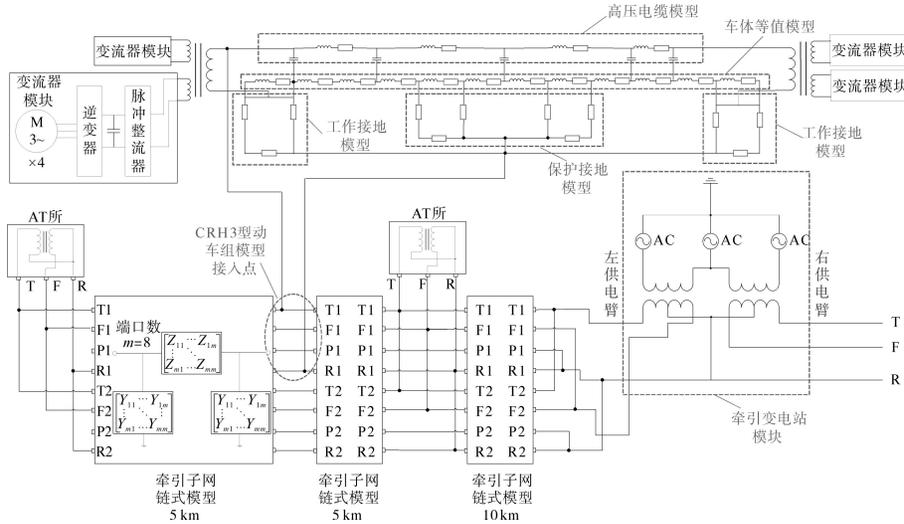


图6 牵引网-动车组系统模型示意图

Fig.6 Schematic of vehicle-grid system model

3 结合坡道参数的分析方法

本节主要讨论结合坡道参数与牵引网-动车组系统等值电路模型的方法,理论分析和仿真思路如图7所示。

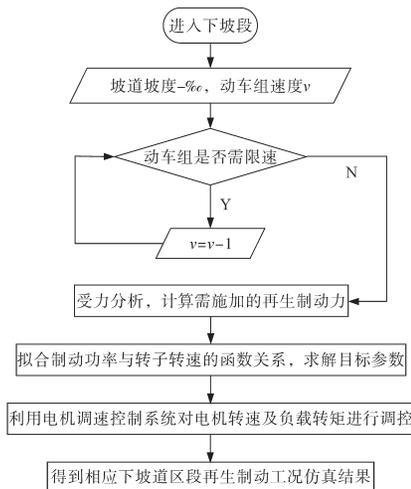


图7 结合坡道参数的再生制动能量分析方法流程图

Fig.7 Schematic for the analysis method of regenerative braking energy regarding slope parameters

3.1 动车组经长大下坡道运行限速分析

由列车运行控制系统工作原理可知,长大下

坡道区段动车组运行速度和坡度、监控制动距离、列车追踪间隔时间以及闭塞分区长度有关。若列车追踪时间超出限值,则需要对动车组进行限速^[12]。

闭塞分区长度计算公式^[13]为

$$L_{block} \geq (L_{brake} + L_{protect} + L_{add})/7 \quad (4)$$

式中: L_{brake} 为列车监控制动距离(单位 m); $L_{protect}$ 为列车安全防护距离,取110 m; L_{add} 为系统应变附加时间 t_{add} 内通过的距离, t_{add} 取13 s; L_{block} 为闭塞分区长度(单位 m)。

列车追踪间隔时间计算公式^[13]为

$$I_{trace} = 3.6 \times \frac{L_{brake} + L_{protect} + L_{block} + L_{EMU}}{v_{block}} + t_{add} \quad (5)$$

式中: I_{trace} 为列车追踪间隔时间(单位 s); L_{EMU} 为动车组长度,取200.67 m; v_{block} 为列车区间运行速度(单位 km/h);3.6为单位换算系数。

下面以CRH3型动车组为例,根据列控系统的减速度曲线^[14],得到初速度为200 km/h的监控制动距离,代入式(4)、式(5),可计算得相应坡度下的 L_{block} 和 I_{trace} 。根据我国高速铁路的实际情

况^[15], L_{block} 取2 000 m, I_{trace} 限值取3 min,通过图7所示的试凑法求出相应坡度下的限速值,计算结果见表2。

表2 $L_{\text{block}}=2\ 000\ \text{m}$, $I_{\text{trace}}<3\ \text{min}$ 的不同坡度限速检算表

Tab.2 Speed limitation for different slopes when

$L_{\text{block}}=2\ 000\ \text{m}$ and $I_{\text{trace}}<3\ \text{min}$

下坡度/%	限速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	监控制动距离/m	列车追踪间隔时间/s
-28	195	6 681	179
-29	187	6 323	179
-30	179	5 940	179
-31	172	5 625	179
-32	165	5 282	179

3.2 动车组经长大下坡道运行受力分析

假设动车组在长大下坡路段的运行方向为正方向,视其为单质点,可知动车组受基本阻力、坡道附加力和制动力的作用。

其中,CRH3型动车组单位基本阻力^[14]为

$$w_0 = 0.42 + 0.0016v + 0.000\ 132v^2 \quad (6)$$

式中: v 为动车组运行速度(单位 km/h); w_0 为单位基本阻力(单位 N/kN)。

坡道单位附加力的计算公式^[14]为

$$w_i = i \quad (7)$$

式中: i 为动车组所处坡道坡度的千分数(%); w_i 为坡道单位附加阻力(单位 N/kN)。

CRH3型动车组最大常用电制动力特性曲线函数如下^[14]:

$$B_e = \begin{cases} 59.8v & v \leq 5\ \text{km/h} \\ -0.285v + 300 & 5\ \text{km/h} < v \leq 106.7\ \text{km/h} \\ 28\ 800/v & v > 106.7\ \text{km/h} \end{cases} \quad (8)$$

式中: B_e 为一个编组所提供的制动力(单位 kN)。

设动车组处于坡度为*i*%的路段且以速度*v*恒速下坡,动车组受力分析如图8所示。

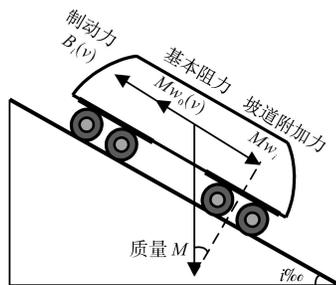


图8 动车组受力分析图

Fig.8 Force analysis of EMUs

由图8可知,动车组以恒速*v*下坡时满足:

$$-B_i(v) - M w_0(v) + M w_i = 0 \quad (9)$$

式中: M 为动车组质量,取为5 000 kN; $B_i(v)$ 为动

车组恒速运行所需的制动力(单位 kN)。

根据表2中不同坡度下的限速值,将其代入式(8)、式(9),分析当动车组只施加再生制动力时能否以恒定限速通过长大下坡路段,计算结果如表3所示。

表3 $I_{\text{trace}}<3\ \text{min}$ 的恒速运行所需制动力

Tab.3 Braking force required for constant speed when $I_{\text{trace}}<3\ \text{min}$

下坡度/%	限速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	所需制动力/kN	最大电制动力/kN
-28	195	112	147
-29	187	119	154
-30	179	126	160
-31	172	132	167
-32	165	139	174

由表3可知,坡度为-32%以下时,动车组以恒定限速运行所需的制动力均小于最大电制动力,因此只需施加再生制动力即可。

3.3 制动功率与转子转速的拟合

基于3.2节的分析结果,可计算动车组轮周处所需制动功率:

$$P = Fv/3.6 \quad (10)$$

式中: F 为所需制动力(单位 kN); v 为动车组运行速度(单位 km/h); P 为所需制动功率(单位 kW);3.6为单位换算系数。

假设每台异步电动机消耗或产生的电能均一致,故单台异步电动机转子转速为

$$\Omega_1 = \frac{P/16}{T_e} \quad (11)$$

式中: Ω_1 为单台电机转子角速度(单位 rad/s); T_e 为单台电机输出转矩(单位 N·m)。

单台电机输出转矩由下式计算^[16]:

$$T_e = \frac{m_1 p}{2\pi f} \frac{U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{(r_1 + C \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{1\sigma} + C x'_{2\sigma})^2} \quad (12)$$

式中: m_1, p, f, U_1 分别为定子绕组的相数、极对数、频率、相电压; $x_{1\sigma}, x'_{2\sigma}$ 分别为定子绕组的电阻和漏抗; r_1, r_2' 为转子绕组的电阻和漏抗归算值; s 为转差率; C 为校正系数。

结合式(3)、式(12)可知,电机的输出转矩与转子转速呈正相关,按梯度设置电机转子的初转速值,通过仿真可得制动工况下各转子转速对应的输出转矩大小。由于再生制动时电机输出转矩为负值,为便于分析取其绝对值。利用Matlab拟合出 $|T_e|$ 与 Ω_1 的函数关系曲线,如图

9所示。

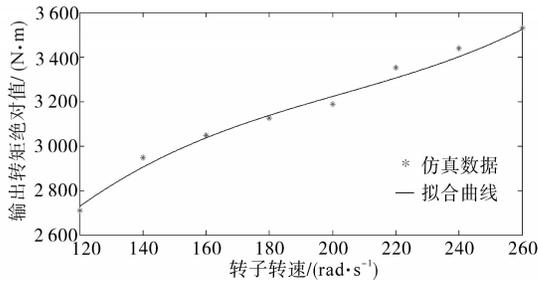


图9 $|T_e|$ 与 Ω_1 函数关系拟合结果

Fig. 9 Fitting results of the relation between $|T_e|$ and Ω_1

$|T_e|$ 与 Ω_1 的三次多项式拟合函数为

$$|T_e| = 0.0003\Omega_1^3 - 0.1823\Omega_1^2 + 41\Omega_1 - 85.81 \quad (13)$$

由式(10)可知, Ω_1 与 P 的近似函数关系为

$$P \approx 0.0048\Omega_1^4 - 2.9186\Omega_1^3 + 656\Omega_1^2 - 1372.96\Omega_1 \quad (14)$$

综上,将3.1,3.2节检算的限速值与所需制动力代入式(10)、式(14),可计算得不同坡度下对应的转子转速计算结果,如表4所示。根据发生制动前电机正常运行时的功率值,结合式(11)可计算出各异步电机相应的负载转矩,可先暂设负载转矩为500 N·m。

表4 不同坡度下对应的转子转速计算结果

Tab.4 Results of rotor speed under different slopes

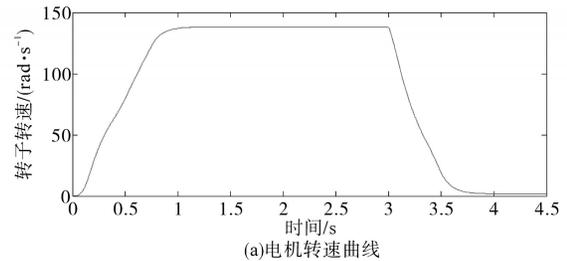
下坡度/%	制动总功率 P/MW	转子转速/(rad·s ⁻¹)
-28	-6.06	133.05
-29	-6.18	134.94
-30	-6.27	136.36
-31	-6.31	136.99
-32	-6.37	137.94

3.4 再生制动工况下仿真结果分析

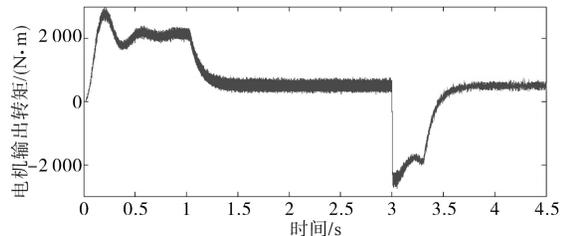
对全长20 km的工程案例进行仿真分析,首先以坡度为-32‰路段为例,通过设置模型的目标速度指令进行仿真模拟,如图10a所示:0~1 s,电机启动并牵引加速至137.94 rad/s;1~3 s,电机转子维持在137.94 rad/s,为制动提供准备条件;3 s时进入制动工况,目标速度指令下调为0 rad/s;电机负载保持为500 N·m。跟随转子转速的动态变化,可仿真得电机输出转矩 T_e 如图10b,中间直流环节电压 U_d 及整流器输入电压 U_N 如图10c,动车组所在供电臂接触网压 U_T 如图10d。

图10b中,当动车组进入制动工况时,可产生与原转矩方向相反的制动力矩,此时电机切换为

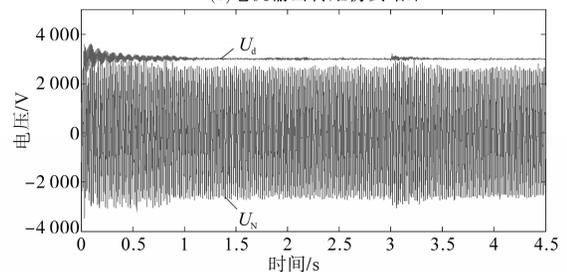
发电机状态,符合再生制动原理。



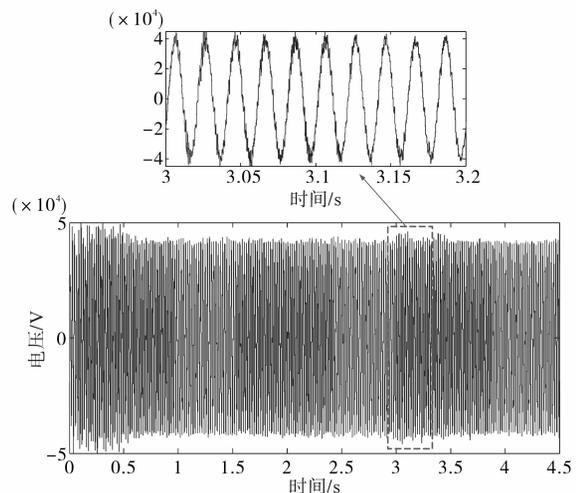
(a)电机转速曲线



(b)电机输出转矩仿真结果



(c)整流器输入电压及中间直流电压仿真结果



(d)动车组所在供电臂接触网压仿真结果

图10 -32‰坡度下牵引网-动车组模型仿真结果

Fig.10 Simulation results of vehicle-grid model under a slope of -32‰

图10c中,制动工况下, U_d 受回馈电能影响发生波动,其峰值 $U_{dmax}=3130$ V,在2700 V至3600 V的范围内,满足要求;由于脉冲整流器闭环控制采用PI调节, U_d 存在一定超调,该超调量亦满足2700 V至3600 V的约束条件。对于CRH3型车,整流器电压额定值为1550 V,考虑工作承载能力的冗余,通常留有1.5的裕度,故在保证机车安全的情况下 U_N 峰值不得超过3288 V, $U_{Nmax}=$

2 950 V 满足要求。

图 10d 中,受电机启动冲击与制动回馈的影响,接触网压 U_T 抬升明显,由于在下坡时动车组出现从静止状态启动的情况较为少见,故本文仅考虑制动回馈造成的影响。制动工况下,接触网压峰值 $U_{Tmax}=41.60$ kV,在牵引网安全供电电压峰值 42.42 kV(有效值 30 kV)的范围内,但超出供电电压瞬时最大峰值 41.01 kV(有效值 29 kV)的限值,为保证供电网络的安全性,需进一步对经过下坡度为 -32% 路段的 CRH3 型动车组的工作时长进行讨论。

综合图 10 的仿真结果可知,当动车组经过下坡度为 -32% 路段时,机车本身性能可满足要求,但其制动回馈电能会对供电网络的安全造成威胁。同理,对下坡度为 $-31\% \sim -28\%$ 路段进行仿真,结果如表 5 所示。

表 5 不同坡度下对应的 U_d 及 U_T 峰值结果

Tab.5 Peak results of U_d and U_T under different slopes

下坡度/ $\%$	P_{total}/MW	U_d/V	U_T/kV
-28	-6.06	3 112	40.80(小于 41.01)
-29	-6.18	3 119	41.00(接近 41.01)
-30	-6.27	3 122	41.30(大于 41.01)
-31	-6.31	3 125	41.40(大于 41.01)
-32	-6.37	3 130	41.60(大于 41.01)

以坡度为 -32% 路段为例,此时动车组限速 165 km/h,考虑到同一供电臂下接触网压处于瞬时最大值(峰值 41.01 kV)的时长不得超过 5 min,可检算出 CRH3 型动车组在一个供电臂范围内持续通过的下坡长度不得超过 13.75 km。若某一供电臂存在 13.75 km 以上、坡度为 -32% 下坡线路,需投入回收装置以保证供电网络的安全。

同理,对下坡度为 -31% , -30% , -29% 路段进行检算,可得在动车组一个供电臂范围内可持续通过的最大坡长分别为 14.33 km, 14.92 km, 15.58 km。

对于下坡度低于 -28% 的路段,高速动车组在正常限速过程中返送的再生制动能量基本不会对牵引网供电安全造成影响。

4 基于实测数据的模型验证

实测数据取自成渝线中与李家湾变电所相连的棉丰电网,李家湾牵引变电所供电范围如图 11 所示。

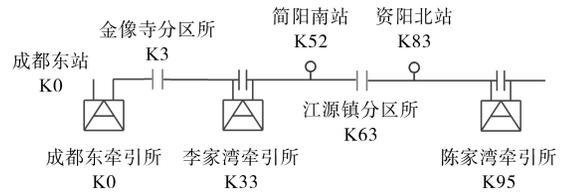


图 11 李家湾牵引变电所供电范围

Fig.11 Lijiawan traction power supply range

各牵引变电所、分区所以及车站的位置均以成都东牵引所的位置为基准点,其中 K3 表示距离成都东牵引所 3 km,以此类推。实测数据包括 2018 年 3 月 7 日李家湾牵引变电所全天有功功率测试值(测试时间间隔为 5 min)以及成渝线上全天车次运行信息。为验证模型再生制动工况下仿真结果的正确性,取实测数据中采集到负有功率值的时间段进行分析。

4.1 车次运行信息分析

2018 年 3 月 7 日 16:00—16:10,车次运行位置关系见图 12,李家湾牵引变电所有功功率在 16:00, 16:05, 16:10 的实测值分别为 5.027 MW, -3.352 MW, 16.758 MW。

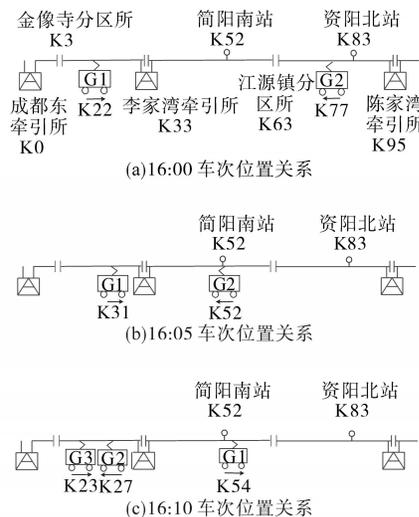


图 12 16:00—16:10 车次运行位置关系

Fig.12 Position of EMUs from 16:00 to 16:10

16:00 时 G1 动车组处于恒速运行工况,此时 G1 功率为 5.027 MW;16:05 时 G1 处于制动工况,产生的再生制动能量一部分供给同一供电臂下恒速运行的 G2,剩余部分返回至李家湾牵引所,此时 G1 产生的再生制动功率值为 -8.379 MW;16:10 时 G1, G2, G3 均处于恒速运行工况,此时 G1 的有功功率为 5.586 MW。

综上,考虑 G1 按 4 动 4 拖编组,可知 G1 单个变流器模块在 16:00, 16:05, 16:10 的有功功率分别为 1.257 MW, -2.075 MW, 1.397 MW。

4.2 仿真值与实测数据对比结果

根据4.1节中给出的有功功率推算值,结合式(11)、式(14),可计算出G1动车组模型单台电机转子转速以及负载转矩,如表6所示。

表6 G1动车组单台电机转子转速及负载转矩计算结果

时刻	转子转速/($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	负载转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)
16:00	168.49	1 865.10
16:05	168.49	1 865.10
16:10	187.26	1 865.10

根据表6的计算结果,在调速系统模型中设置速度目标以及负载转矩目标命令:0~2 s,电机启动并牵引加速至168.49 rad/s;2~4 s,电机转子维持在168.49 rad/s,为制动提供准备条件;4 s时进入制动工况,目标速度指令下调为0 rad/s;5~6.5 s,牵引加速,命令目标速度为187.26 rad/s;电机负载转矩保持为1 865.10 N·m。

如图13所示,动车组单个变流器模块在第一次恒速运行、再生制动运行以及第二次恒速运行消耗的有功功率分别为1.25 MW, -2.01 MW, 1.40 MW,与4.1节中实测数据推算结果基本一致,可证明仿真建模及拟合函数的正确性。

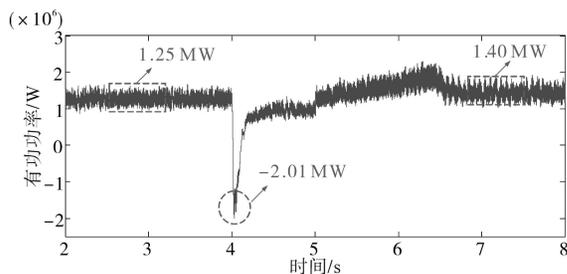


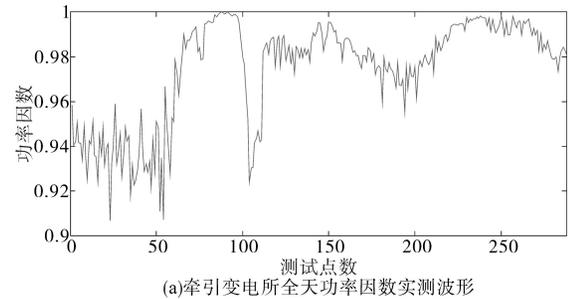
图13 基于实测数据的单个变流器模块有功功率仿真结果

Fig.13 The active power simulation results of a single power unit based on the measured data

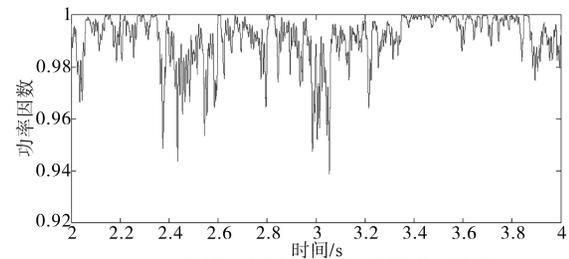
4.3 与实测数据及已有文献的波形对比

图14a为李家湾牵引变电所全天24小时的功率因数实测波形(共288个测试点数),图14b为本文建立的牵引网-动车组耦合模型的功率因数仿真波形,图14c为文献[7]给出的动车组模型功率因数仿真波形。其中,文献[7]建立的模型仅考虑了复杂牵引网结构及动车组整流器,逆变器-电机系统被等效为电流源,并忽略了车顶高压电缆、车体、接地线等部件。

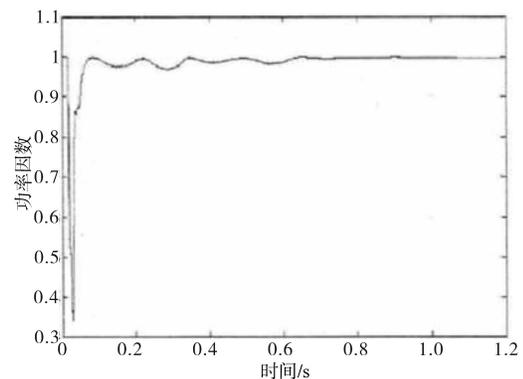
通过对比图14a、图14b、图14c可知,本文采用的建模方法所得的仿真结果更符合实际情况,模型的准确性更高。



(a)牵引变电所全天功率因数实测波形



(b)牵引网-动车组模型功率因数仿真波形



(c)文献[7]中动车组模型功率因数仿真波形

图14 与实测数据及已有文献的波形对比

Fig.14 The waveforms compared with the measured data and literature

5 结论

针对高速铁路中长大下坡路段动车组的再生制动能量问题,已有研究方法通常忽略牵引网、车顶高压电缆、车载变流器、车体、接地线、钢轨回路中一个或多个部件,与实际情况有一定出入,导致电路拓扑结构发生改变,从而影响模型仿真结果的准确性。鉴于此,本文考虑复杂牵引网、动车组牵引传动系统及动车组接地系统等多个部件,建立了详细的牵引网-动车组耦合模型。通过拟合制动功率与转子转速的函数关系,对模型目标指令参数进行求解,实现坡道参数与仿真模型的结合。在此基础上,结合实际数据计算分析了不同线路条件下动车组产生的再生制动能量对牵引网-动车组系统供电安全的影响,得到结论如下:

1)通过对比成渝线棉丰-李家湾的实测数据可知,本文提出的方案能精确仿真出不同线路条

件下动车组产生的再生制动功率对动车组中间直流环节电压及牵引网压的抬升影响,仿真精度可达到0.01 kV,且系统功率因数的仿真结果较已有文献更为符合实际;

2)通过校核牵引网-动车组系统的供电安全性,可知对于下坡度为-32‰, -31‰, -30‰, -29‰路段,CRH3型动车组在一个供电臂范围内可持续通过的最大坡长分别为13.75 km, 14.33 km, 14.92 km, 15.58 km;

3)对于下坡度低于-28‰的路段,CRH3型动车组在正常限速过程中返送的再生制动能量基本不会对牵引网供电安全造成影响。

综上,本文提出的方案较已有的建模方法更符合实际,且仿真结果可精确至0.01 kV。同时,本文提供的建模方法及研究结果可为复杂山区的铁路建设提供设计参考。对于其他型号动车组,可根据各车型的编组方式对变流器模块及动车组接地模型进行相应改动,其理论计算方法及仿真调控方法同理可推。

参考文献

- [1] 罗远煜. 浅谈川藏铁路建设面临的挑战与对策分析[C]//“川藏铁路建设的挑战与对策”2016学术交流会议论文集,中国四川成都:人民交通出版社,2016:582-589.
Luo Yuanyu. On the challenges and countermeasures of Sichuan-Tibet railway construction [C]//“Challenges and Countermeasures of Sichuan-Tibet Railway Construction” 2016 Academic Conference, Chengdu: China Communication Press, 2016:582-589.
- [2] Frilli A, Meli E, Nocciolini D, et al. Energetic optimization of regenerative braking for high speed railway systems[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 129:200-215.
- [3] 吴命利,李群湛. 电力系统与牵引供电系统三相谐波模型[J]. 铁道学报, 1999, 21(1):45-48.
Wu Mingli, Li Qunzhan. Three-phase harmonic modelling for power system and electric traction system [J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(1):45-48.
- [4] 黄可,刘志刚,王英,等. 计及高速铁路站内工况的车体过电压分布特性分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(9):38-45.
Huang Ke, Liu Zhigang, Wang Ying, et al. Analysis on railcar's body over-voltage distributional characteristics considering operating conditions of high-speed railway station[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(9):38-45.
- [5] Huang Ke, Liu Zhigang, Su Dongdong, et al. A traction network chain-circuit model with detailed consideration of integrated grounding system in tunnel path[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(2):535-551.
- [6] Mohamed B, Arboleya P, Ei-sayed I, et al. High-speed 2x25 kV traction system model and solver for extensive network simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 32(5):3837-3847.
- [7] 陈皓栋. 高速列车再生制动工况下的电能质量控制和能量利用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
Chen Haoyue. Research on power quality control and energy utilization of high speed trains under regenerative braking conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 张桂南,刘志刚,向川,等. 交-直-交电车接入的牵引供电系统电压波动特性[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1):121-128, 136.
Zhang Guinan, Liu Zhigang, Xiang Chuan, et al. Voltage fluctuation characteristics of traction power supply system considering AC-DC-AC electric locomotives accessed[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):121-128, 136.
- [9] 刘明晓,王旭光. 再生制动状况下牵引供电系统谐波特性分析[J]. 电子设计工程, 2019, 27(18):69-73.
Liu Mingxiao, Wang Xuguang. Harmonic characteristic analysis of traction power supply system under regenerative braking condition [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(18):69-73.
- [10] 刘磊,胡洋,张永波,等. CRH3型动车组接地系统仿真分析与研究[J]. 铁道车辆, 2016, 54(4):9-12.
Liu Lei, Hu Yang, Zhang Yongbo, et al. Simulation analysis and research on the grounding system for CRH3 multiple units[J]. Rolling Stock, 2016, 54(4):9-12.
- [11] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 高等教育出版社, 2009.
Feng Xiaoyun. Electric traction AC drive and control system[M]. Higher Education Press, 2009.
- [12] 张守帅,田长海. 高速铁路长大下坡地段列车运行速度相关问题研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3):124-129.
Zhang Shoushui, Tian Changhai. Study on the train running speed in the long downhill section of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2017, 38(3):124-129.
- [13] 田长海. 高速铁路列车追踪间隔时间研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(10):1-6.
Tian Changhai. Study on the train headway on automatic block sections of high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(10):1-6.
- [14] 饶忠. 列车牵引计算[M]. 北京:中国铁道出版社. 2010.
Rao Zhong. Train traction calculation[M]. Beijing: China Railway Press. 2010.
- [15] 国家铁路局. TB10621—2014. 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁路出版社. 2015.
State Railway Administration. TB10621—2014. High speed railway design specification[S]. Beijing: China Railway Press. 2015.
- [16] 刘润泽,王宪磊. 异步电动机功率控制系统的应用与研究[J]. 科技视界, 2019(17):60-61.
Liu Runze, Wang Xianlei. Application and research of asynchronous motor power control system[J]. Science & Technology Vision, 2019(17):60-61.

收稿日期:2020-12-22

修改稿日期:2021-01-12