

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514175

# 一种计及长大坡道电气化铁路再生制动 电压稳定性评估方法\*

夏炎<sup>1,2</sup>, 邓云川<sup>3</sup>, 黄可<sup>1</sup>, 梁靖坤<sup>3</sup>, 邓皓元<sup>4</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 611756; 2. 中国铁路经济规划研究院有限公司 北京 100038;  
3. 中铁二院工程集团有限责任公司电气化设计研究院 成都 610031; 4. 新南威尔士大学 悉尼 NSW 2052)

**摘要:**针对长大坡道重负荷电气化铁路运行中因再生制动导致的牵引网电压抬升问题,提出了一种基于电压抬升机理的稳定性评估方法。首先,从理论上推导空载电压、抬升电压、负荷电压与制动电流的矢量关系,构建电压抬升迭代计算模型,揭示制动过电压形成机理。其次,系统分析功率因数、再生功率、负荷位置及系统失稳等因素对电压稳定性作用规律。结果表明:功率因数越高,系统在再生与牵引双工况下电压波动越易平衡,可显著减缓电压抬升;再生功率变化对电压稳定性影响有限;负荷位于供电臂末端时电压抬升最明显,而靠近牵引变电所时抬升幅度显著减弱。并联供电方式可有效提高系统冗余,抑制电压波动。进一步结果显示,空载电压高低对牵引供电能力与再生电压抬升作用存在差异:空载电压较高时系统对再生功率的适应性增强,但过压风险增大;偏低则抬升减弱但牵引能力不足。建议将空载电压控制在 27.5~28.5 kV。最后,研究提出通过引入适量感性负载实现电压抑制的策略。结果表明:增大空载电压夹角,减小负荷电压夹角有利于降低再生制动时的负荷电压。工程应用中需重视感性负载在再生与牵引工况间的动态调节。上述研究为长大坡道电气化铁路的电压稳定性调控提供了理论依据和工程参考。

**关键词:** 电气化铁路;长大坡道;再生制动;电压稳定性评估;迭代计算模型

**中图分类号:** U223.6 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3010

## An electrified railway traction grid voltage stability assessment method under regenerative braking regarding long and steep grades

Xia Yan<sup>1,2</sup>, Deng Yunchuan<sup>3</sup>, Huang Ke<sup>1</sup>, Liang Jingkun<sup>3</sup>, Deng Haoyuan<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. China Railway Economic and Planning Research Institute Co. Ltd., Beijing 100038, China; 3. Electrification Design and Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China; 4. University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia)

**Abstract:** This article investigates the voltage rise problem induced by regenerative braking in heavy-load electrified railways with long gradients and proposes a stability evaluation method based on the rise mechanism. An iterative model is formulated by deriving vector relationships among no-load voltage, rise voltage, load voltage, and braking current, revealing the formation of overvoltage during braking. The effects of power factor, regenerative power, load position, and system instability on voltage stability are analyzed. Results show that a higher power factor facilitates voltage balance under combined traction and braking, significantly mitigating voltage rise, while the influence of regenerative power variation is limited. Voltage rise is most severe when the load is located at the end of the power supply arm and weakest near the substation. Parallel power supply enhances system redundancy and suppresses fluctuations. Further analysis indicates that no-load voltage level plays a dual role, which is that higher values improve adaptability to regenerative power but increase overvoltage risk. However, lower values reduce rise but constrain traction capacity. A recommended

收稿日期: 2025-06-18 Received Date: 2025-06-18

\*基金项目: 中国国家铁路集团有限公司重大课题(K2024G004)、国家自然科学基金青年基金(52202450)、四川省自然科学基金(24NSFSC7137)、中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所技术服务(KYL202411-0134)、四川省重大科技专项(2023ZDZX0008-04)项目资助

range of 27.5~28.5 kV is suggested. In addition, introducing inductive loads is shown to effectively suppress voltage rise by enlarging the no-load voltage angle and reducing the load voltage angle. An engineering application requires dynamic adjustment of inductive loads between regenerative and traction states. This study provides theoretical and practical guidance for voltage stability regulation in long-gradient electrified railways.

**Keywords:** electrified railway; long gradient; regenerative braking; voltage stability evaluation; iterative calculation model

## 0 引言

我国电气化铁路移动装备经历了由直传动向交流传动的过渡,电力机车和动车组普遍采用交流传动系统<sup>[1-2]</sup>。实际运营中,受线路坡度、弯道半径等影响,电动机在制动工况下转为发电机,将势能转化为电能反馈至牵引供电系统,导致牵引网电压抬升。随着我国西部复杂山区铁路建设加快,长大坡道线路的比重不断上升,部分线路坡度高达30%,坡长达数10 km,列车运行速度较快,制动工况持续且功率大,牵引网电压抬升问题愈加严重。在极端情况下,过高的电压甚至可能威胁行车安全,亟需引起重视。

牵引网电压抬升可在多种工况下发生,如再生制动、列车升降弓、过电分相及弓网离线等<sup>[3]</sup>。围绕这些工况,学者们已开展了大量研究。例如,针对弓网离线引起的瞬态电压抬升,研究多集中于提升离线识别精度和改善弓网动态特性,以降低离线概率<sup>[4-7]</sup>;另有研究系统分析了离线电弧的电气特性及其对过电压的影响,为电压抑制提供参考<sup>[8-9]</sup>。针对列车过电分段时引起的过电压问题,文献[10]提出了建模分析方法以揭示过电压影响机制,文献[11]通过控制晶闸管合闸角度或在中性段配置阻容装置,有效缓解了合闸和截流过程中的过电压问题。再生制动是导致牵引网电压超限的主要因素之一<sup>[12]</sup>。现有研究多集中于城市轨道交通系统,并主要依赖现场试验和仿真分析。例如,文献[13]基于广州市轨道交通九号线的实测,分析了能馈装置对地铁供电系统稳定性、电能质量及牵引供电设备寿命的影响;文献[14]通过厦门地铁的试验场景,评估了能馈装置在稳压方面的效果。文献[15]建立了完整牵引传动系统模型以模拟再生制动过程。近年来,部分研究也逐步延伸至复杂山区铁路,关注再生制动对牵引网电压的影响<sup>[16-17]</sup>。其中,文献[16]分析了列车在不同坡度区段下再生制动能量对牵引网电压及中间直流环节电压安全的影响;文献[17]提出了车载储能系统方案,以抑制山区再生制动引发的电压波动。然而,上述研究多偏重于应用层面的验证与方案设计,缺乏对再生制动电压抬升机理的系统剖析。

再生电能的利用方式多种多样,包括超级电容、逆变能馈和飞轮储能等装置<sup>[2,18-19]</sup>。针对再生制动能量引起的牵引网电压抬升问题,已有大量学者开展了飞轮储能

装置、逆变能馈装置等传统方案的应用研究<sup>[18-19]</sup>。文献[20]提出了一种融合能馈系统与储能系统的混合型再生能量利用方案及其控制策略,通过仿真验证该方法既能实现城轨交通再生能量高效利用,又能有效抑制牵引网母线电压波动。文献[21]提出了同相牵引供电方式,但受限于系统容量和牵引变压器容量;文献[15]结合双边供电与再生能量释放装置,分析得到能量释放装置抑制效果更优的结论;文献[22]提出了投入地面谐波综合治理装置和牵引供电末端电能质量综合治理装置方式,分析结果表明:两种方案均可有效稳压,但存在安装位置受限、成本较高及可能降低变电所功率因数等问题;文献[23-24]提出了基于模块化多电平变换器的STATCOM装置,通过车网耦合仿真验证了其在电压波动抑制、拓扑结构较简单及电能质量综合治理的优势。针对弱电网条件下牵引网电压越限问题,文献[25-26]提出在分区所配置储能型模块化多电平铁路功率调节器,并结合多层次能量管理策略。该方法通过有功平衡、装置自支撑与储能辅助的协同作用,有效实现牵引网电压调节。仿真结果表明,该方案能够显著抑制电压越限并提升系统整体稳定性。

然而,上述相关研究存在的问题为:

- 1) 尽管现有研究通过建立精细的仿真模型进行分析,但模型构建较为复杂,且未能从原理层面深入揭示再生制动过电压的影响机理;
- 2) 现有研究未能全面考虑长大坡道路段再生制动电压抬升的多种影响因素,例如功率因数、负荷位置等;
- 3) 缺乏基于原理的再生制动电压稳定性方法研究。

鉴于此,本研究提出一种计及长大坡道的电气化铁路再生制动电压稳定性评估方法。以带回流线直接供电为例,推导列车再生制动时电网、牵引网与列车系统间的电压抬升关系,通过迭代计算分析功率因数、再生功率、运行方式、负荷位置及系统失稳的影响,结合丽香线实测数据验证方法有效性,并基于空载电压与负荷电压角度接近有助于抑制过电压的结论,提出引入感性负载的治理策略。

## 1 再生制动电压抬升迭代计算方法

电力机车或动车组作为牵引负荷,普遍采用交流传动方式。在制动工况下,交流电动机转为发电状态,将下

坡过程中的势能转化为电能并反馈至牵引供电系统,导致牵引网电压抬升。长大坡道为与列车牵引质量和运行速度相匹配的最大设计坡度区段,其制动工况具有“功率大、持续时间长”的特点,列车在此类路段行驶时,极易导致再生能量大量注入牵引网,可能使电压抬升超过设备允许的正常的工作范围,不仅影响列车制动功率的充分释放,甚至在严重情况下危及行车安全。图 1 给出了交流传动移动装备的电压工作特性。再生制动电压抬升原理分析见后文。

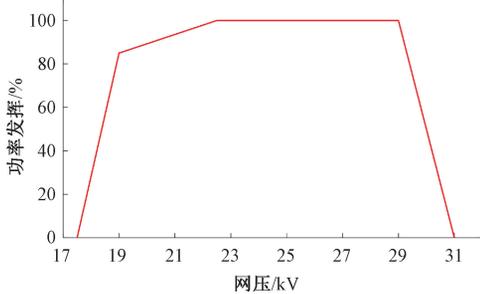


图 1 交流传动列车功率输出与工作电压关系曲线  
Fig. 1 Relationship curve between power output and working voltage of AC drive train

牵引负荷在制动过程中电压抬升可分为电网系统、牵引网和牵引变电所 3 部分的电压抬升。假设初始牵引负荷电压、制动电流、功率因数角度,牵引网抬升电压和空载电压分别为  $U_1$ 、 $I$ 、 $\alpha$ 、 $U_2$  和  $U_3$ 。制动工况下,按照恒功率  $P$  假设,制动视在功率为  $P+jQ$ ,初始制动电流  $I=P/U_1/\cos(\alpha)$ 。依据式(1)~(2)可分别计算牵引网、变电所和电网系统的电压抬升量  $\Delta U$  和功率损耗  $\Delta S$ 。

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U} \quad (1)$$

$$\Delta S = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} (R + jX) \quad (2)$$

根据式(1)~(2),计算出制动过程中牵引网电压抬升量  $U_2$ (图 2)。当空载电压与抬升电压向量和等于负荷电压时系统形成闭合稳定三角形,达到稳定状态。若不满足该条件,以抬升电压  $U_2$  顶点为圆心、空载电压  $U_3$  为半径绘制圆,圆与负荷电压向量交点为新的负荷电压  $U_1$ ,进而得出新的制动电流  $I$ ,启动新一轮计算,直到系统稳定。图 3 为牵引工况下电网、牵引网和列车系统各电压抬升关系。

迭代计算流程见图 4。根据正弦定理,当负荷电压  $U_1$  对应角度  $\gamma$  为直角( $90^\circ$ )时,  $U_1$  达到最大值(空载电压  $U_3$  定值,  $\max U_1 = \frac{U_3}{\sin\beta}$ )。这表明,为控制  $U_1$  的抬升,有效措施是降低  $U_1$  或者提高图 3 中稳定三角形中

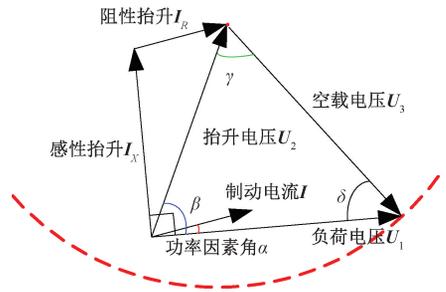


图 2 再生制动时电网、牵引网和列车系统各电压抬升关系  
Fig. 2 Voltage rise between the power grid, the traction grid and the train system during regenerative braking

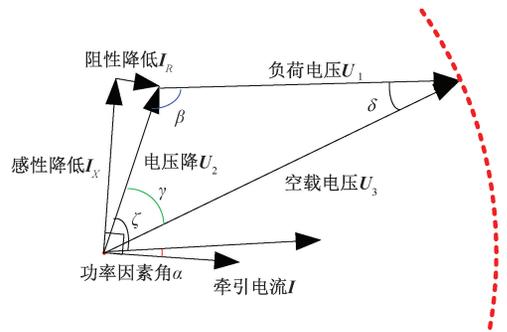


图 3 牵引工况下电网、牵引网和列车系统各电压抬升关系  
Fig. 3 Voltage rise relationships among power grid, traction grid and train system under traction condition

$U_1$  对应角度。然而,降低  $U_1$  会增加牵引工况下正向负荷电压不足,从而导致电压崩溃风险(图 3)。因此,必须结合牵引与再生制动对空载电压的相反需求,找到一个最佳平衡点。

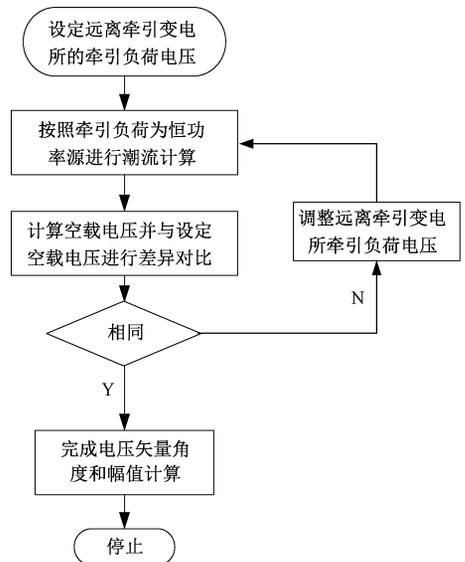


图 4 迭代计算流程

Fig. 4 Iterative calculation process

## 2 再生制动电压抬升影响因素分析

基于第1章提出的方法,分析再生制动电压抬升的影响因素。系统参数为:牵引网阻抗  $0.0636+j0.2541 \Omega/\text{km}$ ,牵引变压器容量 31.5 MVA,电网短路容量 1 000 MVA,供电臂长度 25 km,单车再生负荷 19 200 kW。

### 2.1 功率因数影响

采用交流传动电力牵引系统及四相限脉宽调制整流技术的功率因数高于 0.97。不同功率因数导致抬升电压分量角度及相角差异,影响系统稳定后负荷电压抬升。

根据图 5 计算结果,功率因数越高,电压抬升效果越不显著。如表 1 所示,当功率因数为 0.97 时,空载电压对应角度约  $67^\circ$ ,意味着再生负荷电压最高为空载电压的 1.086 倍 ( $1/\sin(67^\circ)$ )。因此,以再生负荷电压不超过

29 kV 为控制目标,空载电压不能超过 26.7 kV。同理,功率因数为 0.98 时,结合表 2,空载电压不应超过 27.07 kV。功率因数为 0.99 时,结合表 3,空载电压不应超过 27.7 kV。由此可见,功率因数越高,越有利于实现兼顾再生电压抬升与牵引电压降低双重工况。

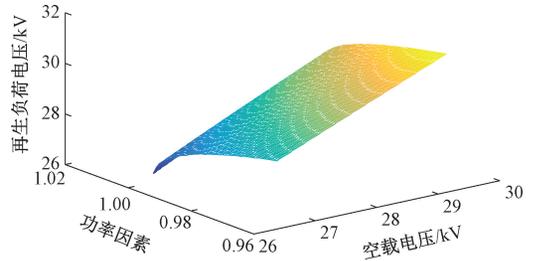


图 5 不同空载电压和功率因数下再生负荷电压  
Fig. 5 Regenerative load voltage at different no-load voltages and power factors

表 1 功率因数 0.97 时不同空载电压下网压参数

Table 1 Grid voltage parameters under different no-load voltages when power factor 0.97

空载电压/kV	空载电压角度/ $(^\circ)$	再生负荷电压/kV	再生负荷电压角度/ $(^\circ)$	电压抬升幅值/kV	电压抬升角度/ $(^\circ)$
27.5	67.11	29.48	99.18	7.073	13.71
28.0	66.98	29.98	99.83	6.943	13.19
29.0	66.96	30.03	100.34	6.930	12.70

表 2 功率因数 0.98 时不同空载电压下网压参数

Table 2 Grid voltage parameters under different no-load voltages when power factor 0.98

空载电压/kV	空载电压角度/ $(^\circ)$	再生负荷电压/kV	再生负荷电压角度/ $(^\circ)$	电压抬升幅值/kV	电压抬升角度/ $(^\circ)$
27.5	69.84	29.13	96.12	7.111	14.05
28.0	69.68	29.65	96.81	6.971	13.51
29.0	69.41	30.65	98.07	6.715	12.54

表 3 功率因数 0.99 时不同空载电压下网压参数

Table 3 Grid voltage parameters under different no-load voltages when power factor 0.99

空载电压/kV	空载电压角度/ $(^\circ)$	再生负荷电压/kV	再生负荷电压角度/ $(^\circ)$	电压抬升幅值/kV	电压抬升角度/ $(^\circ)$
27.5	73.38	28.68	92.12	7.187	14.50
28.0	73.22	29.20	92.84	7.042	13.94
29.0	72.92	30.28	94.20	6.765	12.88

### 2.2 再生制动功率影响

制动电压抬升最大值受稳定三角形中空载电压对应角度影响。设定功率因数 0.99,分析再生功率 11 520 ~ 25 000 kW 区间变化时对空载电压角度的影响。根据图 6 所示计算结果,随着功率变化,角度在  $71.4^\circ \sim 75.73^\circ$  波动,平均角度  $73.17^\circ$ ,角度变化引起最大电压抬

升幅度约 2.5%。为确保再生负荷电压不超 29 kV,依据最小角度  $71.4^\circ$ ,空载电压上限应控制在 27.48 kV。

再生功率还直接决定电压抬升向量幅值。再生负荷电压达到极值时,电压抬升向量理论上最大幅值为  $8.77 \text{ kV} (29 / \tan(73.17^\circ))$ 。结合 2.1 节功率因数为 0.99 计算结果(表 3),当空载电压为 27.5 kV 时,电压

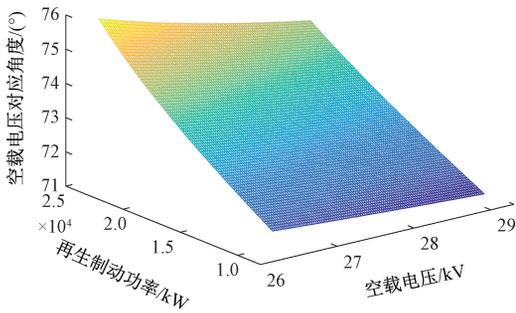
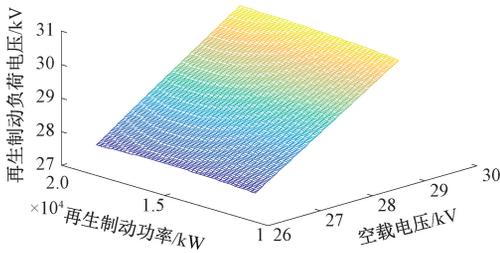


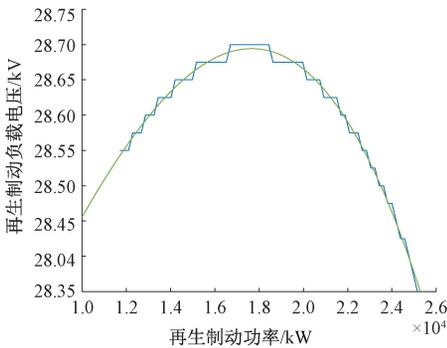
图 6 不同再生制动功率下空载电压对应角度分布  
Fig. 6 No-load voltage corresponding angle distribution under different regenerative braking powers

抬升为 7.187 kV, 对应的再生负荷电压角度为 92.12°, 接近电压抬升的理论极限(即 90°), 表明: 再生功率达到 19 200 kW 时系统运行逼近电压抬升最大工况。

进一步计算不同再生功率与空载电压组合下负载电压变化(最大电压抬升对应的制动功率为 19 392 kW)。如图 7(a)所示, 再生功率是影响电压抬升幅度与系统安全裕度关键因素。根据图 7(b), 再生功率变化对电压抬升影响不明显。相同空载电压下, 整体呈曲率较缓弧形, 最高电压对应的制动功率不是最大值。



(a) 不同再生功率与空载电压组合  
(a) Different combinations of regenerative power and no-load voltage



(b) 不同再生功率(空载电压 27.5 kV)  
(b) Different regenerative powers (no-load voltage 27.5 kV)

图 7 不同再生功率下负载电压

Fig. 7 Load voltage at different regenerative powers

### 2.3 复线牵引网运行方式影响

2.1 和 2.2 节计算分析基于上下行分开供电方式。为提升供电系统性能, 实际复线电气化铁路也常采用上下行接触网并联供电, 以平衡牵引负荷并提高整体供电能力。并联供电可在相同空载电压下提升电压向量夹角, 有效抑制制动引起的牵引网电压抬升, 同时抑制正向牵引工况下电压下降, 便于实现电压双向调控。图 8 给出了不同空载电压和功率因数条件下再生负荷电压分布计算结果。与图 5 对比, 可见并联供电在提升系统供电裕度和抑制电压波动方面有显著优势。

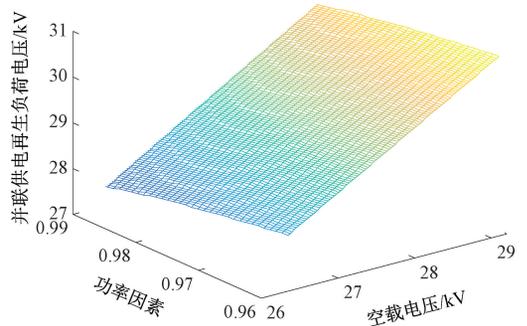


图 8 不同参数下并联供电再生负荷电压  
Fig. 8 Voltage of parallel power supply regenerative load under different parameters

### 2.4 不同列车位置影响

上述计算均基于再生制动负荷位于供电臂末端。当负荷位于供电臂不同位置时, 电压抬升的 3 个分量中, 牵引变压器和电网系统电压抬升几乎无变化, 牵引网电压抬升分量幅值相对显著降低。同时, 牵引变压器电压分量的阻抗角最小, 系统整体阻抗角有所提升。功率因数按 0.99, 空载电压按 27.5 kV 开展计算, 得到图 9。由图可知, 再生制动负荷位于末端时, 电压抬升最严重, 随着负荷向变电所移动, 电压抬升逐步减少。

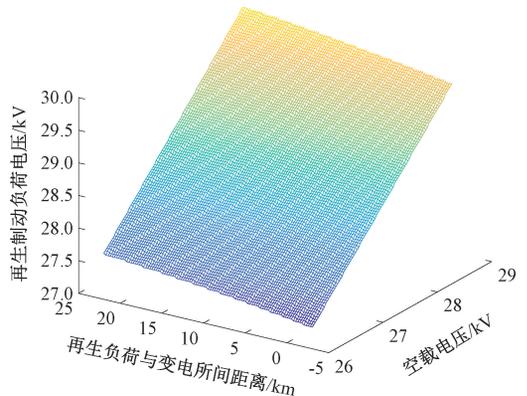


图 9 列车在不同位置时不同空载电压对应制动电压  
Fig. 9 Braking voltages under different no-load voltages when the train is at various positions

## 2.5 系统失稳分析

当负荷波动引起牵引网抬升电压向量  $U_2$  幅值增加时,若初始负荷电压对应角度  $\gamma < 90^\circ$ , 负荷电压  $U_1$  抬升, 且因负荷电流同步减小, 减缓  $U_2$  幅值增加; 反之, 若  $\gamma \geq 90^\circ$  时,  $U_1$  降低, 负荷电流同步增加, 加速  $U_2$  幅值增加。极端情况下, 若  $U_2$  向量顶点为圆心、以空载电压  $U_3$  为半径作圆与  $U_1$  无交点, 则系统失稳。实际运行中, 再生功率和电流的持续增加使系统在某一节点加速进入崩溃点。如图 10 所示计算结果(功率因数取 0.99), 再生负荷位于供电臂末端。随着再生功率提升, 负荷电压先升后降, 至最低点后再上升并出现振荡, 系统失稳随之发生。

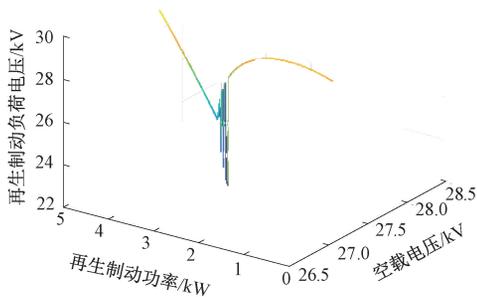


图 10 不同再生功率和空载电压下负荷电压

Fig. 10 Variation of load voltage with regenerative power and no-load voltage

根据图 10, 空载电压越高, 系统失稳对应的再生功率越大, 表明: 空载电压有很强的功率适应性, 不宜设置过低。同时, 空载电压过高可能引发电压抬升超限。综合考虑, 空载电压宜控制在 27.5~28.5 kV。

## 3 现场测试分析

测试地点在丽江至香格里拉线螺蛳湾牵引变电所所辖大坡道区段。该线路位于云南省西北部, 南起大丽铁路丽江站, 北至香格里拉, 全长 139.7 km, 为 30% 加力坡单线电气化铁路。测试分析聚焦螺蛳湾牵引变电所再生制动工况, 额定功率 19 200 kW。

### 3.1 功率因数

图 11 为螺蛳湾牵引变电所供电臂制动工况下高压侧、低压侧及列车功率因数曲线(2023 年 11 月 17 日采集)。再生功率达 12.8 MW 时, 功率因数主要集中在  $-0.98 \sim -1$ 。

### 3.2 电压抬升情况

再生制动负荷电流、牵引变电所母线电压测试结果见图 12、13。实测电流最大为 437 A, 母线电压最高为 27.73 kV。

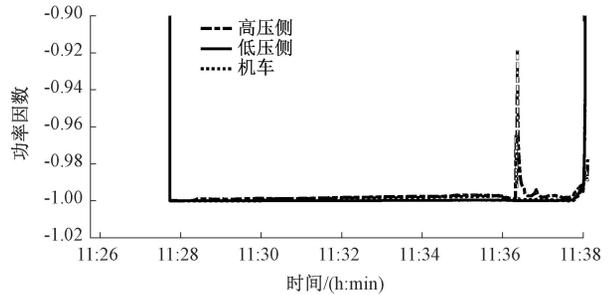


图 11 螺蛳湾牵引变电所供电臂制动工况功率因数曲线

Fig. 11 Power factor characteristics of the supply arm of Luosiban traction substation during braking operation

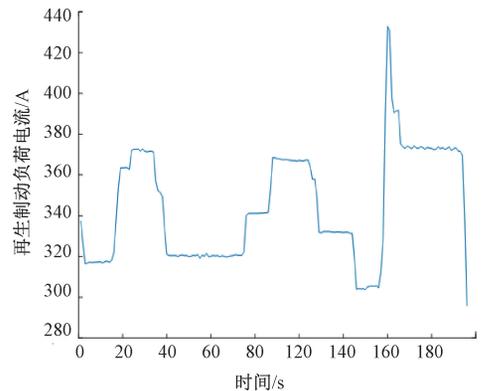


图 12 不同时刻再生制动负荷电流

Fig. 12 Regenerative braking load current at different time instants

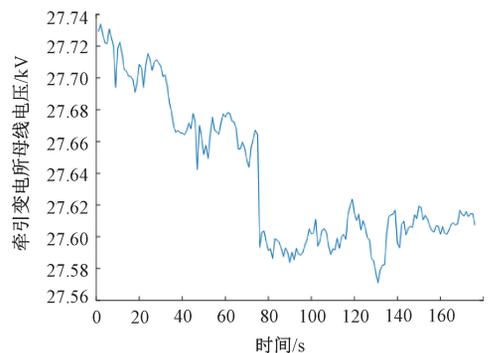


图 13 不同时刻再生制动母线电压

Fig. 13 Bus voltage during regenerative braking at different time instants

根据计算模型分析, 得到不同再生功率下各列车位置负荷电压、母线电压和再生制动电流(见图 14~16)。结果显示: 再生功率为额定值 0.8 倍时, 电流为 550 A; 0.6 倍时为 420 A; 0.5 倍时为 346 A。负荷电压在牵引变电所最小, 供电臂末端最大, 最大值达 28.25 kV。母线电压变化趋势与负荷电压相反, 在变电所最大, 供

电臂末端最小,最大值为 27.92 kV。计算结果与实测数据在变化趋势上高度一致,数值略有偏差(主要由于系统短路容量与实际工程存在差异),但整体误差控制在合理范围内,验证了所提迭代计算方法的工程适用性与准确性。

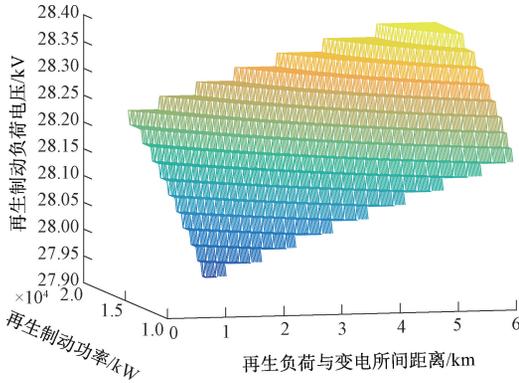


图 14 不同功率、列车位置下再生制动负荷电压  
Fig. 14 Regenerative braking load voltage under different powers and train positions

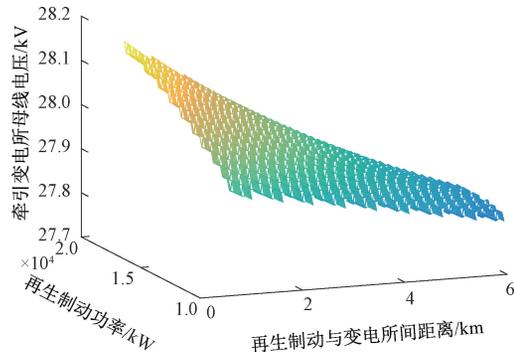


图 15 不同功率、列车位置下母线电压  
Fig. 15 Bus voltage under different power levels and train positions

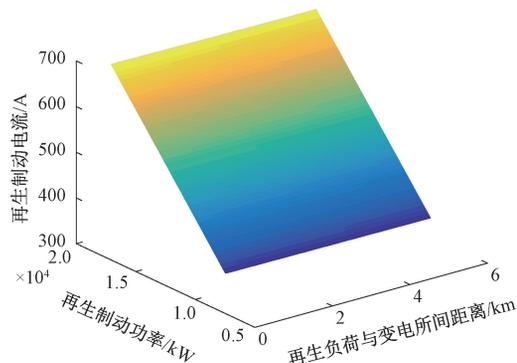


图 16 不同功率、列车位置下再生制动电流  
Fig. 16 Regenerative braking current under different power levels and train positions

## 4 再生制动电压抬升抑制策略

如前文所述,再生制动过程中的电压抬升现象,本质上可以由空载电压、抬升电压与负荷电压构成的向量三角形描述。其中,空载电压作为系统运行的初始条件,可视作定值;抬升电压与负荷电压相互作用,迭代演化,最终达到稳定平衡。当三者满足向量闭合条件,可实现电压稳定。如图 2 所示,依据正弦定理,降低负荷电压有效途径是增加空载电压的夹角,并相应减小负荷电压的夹角。当两者夹角相等时,空载电压与负荷电压幅值相等,再生制动期间电压不再产生抬升现象。

基于上述原理,在再生制动期间引入适当感性负载计算分析。以功率因数 0.99、空载电压 27.5 kV、再生负荷位于供电臂末端为工况条件,仿真分析不同感性负载对该点电压的调节效果,结果见图 17。显然,在一定范围内,投入负载电感值越大,电压抬升抑制效果越明显。

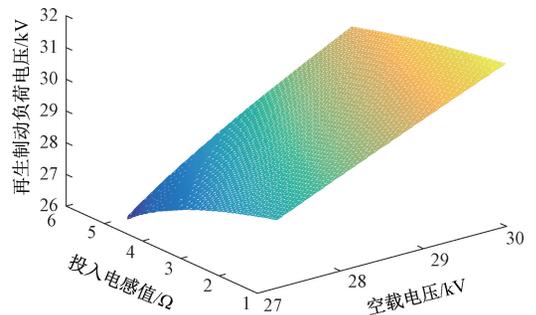


图 17 投入不同电感负荷下不同空载电压对应负荷电压  
Fig. 17 Load voltage corresponding to different no-load voltages under various inductive loads

## 5 结 论

针对电气化铁路长大坡道重负荷运行中再生制动电压抬升引发的电压稳定问题,提出了一种电压稳定性评估方法。通过推导电压与电流的矢量关系,提出了迭代计算方法,分析了功率因数、再生功率等因素对电压稳定的影响,验证了方法的准确性,并提出了通过感性负载治理制动过电压的解决方案。主要结论包括:

- 1) 较高功率因数有助于平衡再生电压抬升与牵引电压降低的双重工况,再生功率对电压抬升影响相对较小。
- 2) 对于复线牵引网系统,并联供电方式有利于提高系统供电裕度并抑制电压波动。随着负荷向牵引变电所移动,牵引网电压抬升逐渐减少。
- 3) 空载电压的高低对牵引工况下的供电能力及再生

电压抬升有不同影响。空载电压需在满足两者需求基础上,设定最佳值。

4) 增加空载电压夹角并减少负荷电压夹角是降低负荷电压的有效手段。两者夹角相等时,电压抬升消失。引入适当感性负载可有效抑制电压抬升。无法平衡再生与牵引电压要求时,应以保障再生制动电压为主,适当降低牵引电压要求。

尽管感性负载在再生制动期间可有效抑制电压抬升,但在牵引工况下会引发无功功率增加,导致系统功率因数下降及受电弓电压降低。因此,该方法的工程应用需实现感性负载在不同工况间的动态调节。当前尚缺乏具备此类功能的成熟装置,相关的工程实现路径与控制策略仍有待进一步研究与技术突破。

### 参考文献

[1] 向文凯,郭强,肖蕙蕙,等. Vienna 整流器网压重构功率控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 154-162.

XIANG W K, GUO Q, XIAO H H, et al. Grid voltage reconfiguration predictive power control of Vienna rectifiers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 154-162.

[2] 刘维莎,石荣亮,周其锋,等. 基于超级电容的双向DC/DC变换器建模与控制[J]. 电子测量技术, 2024, 47(14): 72-79.

LIU W SH, SHI R L, ZHOU Q F, et al. Research on modeling and control of bidirectional DC/DC converter based on supercapacitor[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(14): 72-79.

[3] 肖嵩,曹野,吴广宁,等. 高铁过电压对车载牵引供电系统的影响机理及抑制方法:系统性综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4682-4702.

XIAO S, CAO Y, WU G N, et al. Influence mechanism and suppression methodologies of the overvoltage of high-speed railway on the vehicle-mounted traction power supply system: Systematic review[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4682-4702.

[4] WANG X F, SONG Y, YANG H N, et al. A time-frequency dual-domain deep learning approach for high-speed pantograph-catenary dynamic performance prediction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 238: 113258.

[5] 陈仁祥,王帅,杨黎霞,等. 弓网接触力长短时记忆网络预测的受电弓主动控制与仿真[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 192-198.

CHEN R X, WANG SH, YANG L X, et al. Active

control and simulation for pantograph based on contact force prediction of long short-term memory network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 192-198.

[6] 李斌,舒嘉辉,严灵潇,等. 改进黑翅鸢算法的1D-2D-GAF-PCNN-GRU-MSA弓网电弧检测应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 201-211.

LI B, SHU J H, YAN L X, et al. 1D-2D-GAF-PCNN-GRU-MSA pantograph arc detection application based on improved black-winged kite algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 201-211.

[7] 李斌,阎君宇. 基于GAF-CNN的弓网电弧识别方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 188-195.

LI B, YAN J Y. Research on recognition method of pantograph arc based on GAF-CNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 188-195.

[8] HUANG K, SU D D. Extended pantograph-catenary arc modeling and an analysis of the vehicular-grounding electromagnetic transients of electric multiple units[J]. Energies, 2024, 17(7): 1512.

[9] 李斌,姜璟,杜典松. 基于SOA-SVM的弓网电弧识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 83-91.

LI B, LOU J, DU D S. Pantograph arc recognition method based on SOA-SVM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 83-91.

[10] HUANG K, LIN G B, LIU ZH G, et al. Research on transient over-voltages of high-speed train passing articulated split-section insulator[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1664-1682.

[11] 普建刚,詹磊,张颖斐,等. 地面带电自动过分相暂态过电压分析与抑制技术研究[J]. 电工技术, 2025(14): 179-182.

PU J G, ZHAN L, ZHANG Y F, et al. Research on transient overvoltage analysis and suppression technology of automatic ground convert scheme[J]. Electrical Engineering Technology, 2025(14): 179-182.

[12] 陈劲草. 电气化铁路牵引供电系统电压匹配关系优化[J]. 电气化铁道, 2024, 35(3): 13-18.

CHEN J C. Optimization of voltage matching relationship

- in electrified railway traction power supply system [J]. *Electrified Railway*, 2024, 35(3): 13-18.
- [13] 卢海明. 能馈装置对广州市轨道交通九号线供电系统的影响[J]. *电力机车与城轨车辆*, 2020, 43(1): 74-77.  
LU H M. Effects of the feeding device on the power supply system of Guangzhou metro line 9 [J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2020, 43(1): 74-77.
- [14] 林家通. 厦门地铁 2 号线再生能馈装置稳压试验分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(4): 56-59.  
LIN J T. Analysis of stabilization test for regenerative energy feedback device of Xiamen metro line 2 [J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(4): 56-59.
- [15] 魏文婧, 胡海涛, 王科, 等. 基于铁路功率调节器的高速铁路牵引供电系统储能方案及控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1290-1299.  
WEI W J, HU H T, WANG K, et al. Energy storage scheme and control strategies of high-speed railway based on railway power conditioner [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1290-1299.
- [16] ZHANG Q, ZHANG Y X, HUANG K, et al. Modeling of regenerative braking energy for electric multiple units passing long downhill section [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(3): 3742-3758.
- [17] 陈剑箫, 王英, 陈小强, 等. 一种考虑山区路段牵引网电压波动及谐波治理的车载储能型解决方案[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(6): 1582-1594.  
CHEN J X, WANG Y, CHEN X Q, et al. An on board energy storage solution considering voltage fluctuations and harmonic control of traction networks under mountain area conditions [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(6): 1582-1594.
- [18] 李玉光, 刘翔, 梁艳召, 等. 飞轮储能装置在轨道交通中的应用研究 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(8): 2679-2686.  
LI Y G, LIU X, LIANG Y ZH, et al. Research on the application of flywheel energy storage device in rail transit [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(8): 2679-2686.
- [19] 王振国, 唐文清, 杨超华. 城市轨道交通中压回馈型再生制动吸收装置的研究 [J]. *城市轨道交通研究*, 2023, 26(2): 69-71.  
WANG ZH G, TANG W Q, YANG CH H. Medium-voltage feedback type regenerative braking absorption device in urban rail transit [J]. *Urban Mass Transit*, 2023, 26(2): 69-71.
- [20] 李志强, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 城轨交通混合型再生制动能量利用系统及其控制策略 [J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(11): 203-210.  
LI ZH Q, HU H T, CHEN J Y, et al. Hybrid regenerative braking energy utilization system and its control strategy in urban rail transit [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(11): 203-210.
- [21] 王瀚艺, 刘小涵. 抑制再生制动引起的牵引网网压抬升方法研究 [J]. *变频器世界*, 2017(8): 88-94.  
WANG H Y, LIU X H. Research on the control of network voltage rise for regenerative braking progress [J]. *The World of Inverters*, 2017(8): 88-94.
- [22] 陈浩. 关于牵引网电压偏高问题的分析与对策 [J]. *西铁科技*, 2016(4): 15-18.  
CHEN H. Analysis and countermeasures for the overvoltage issue in the traction network [J]. *Xi'an Railway Technology*, 2016(4): 15-18.
- [23] LIU ZH G, HU X X, LIAO Y CH. Vehicle-grid system stability analysis based on norm criterion and suppression of low-frequency oscillation with MMC-STATCOM [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(3): 757-766.
- [24] 章叶心. 长大下坡路段动车组再生制动电压抬升分析及抑制方案 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
ZHANG Y X. Analysis of voltage rise and suppression scheme of regenerative braking when electric multiple units pass long downhill section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [25] 李腾, 马永刚, 侯凤娟, 等. 基于储能型铁路功率调节器的弱牵引网电压越限抑制措施研究 [J]. *电气工程学报*, 2024, 19(3): 115-127.  
LI T, MA Y G, HOU F J, et al. Research on voltage overlimit suppression measures for weak traction networks based on energy storage type railway power conditioner [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(3): 115-127.
- [26] 李腾, 侯凤娟, 马永刚, 等. 基于储能型 MMC-RPC 的弱牵引网电压越限抑制方案 [J]. *电气化铁道*, 2025, 36(1): 9-16.  
LI T, HOU F J, MA Y G, et al. Overlimit suppression scheme of weak traction network voltage based on energy storage type MMC-RPC [J]. *Electrified Railway*, 2025, 36(1): 9-16.

## 作者简介



夏炎,2012年于北京交通大学获得学士学位,2014年于北京交通大学获得硕士学位,2020年至今于西南交通大学攻读博士学位,同时为中国铁路经济规划研究院有限公司高级工程师,主要研究方向为轨道交通供电系统优化、电气化铁路电能质量监测与优化控制。

E-mail:xia15120074099@sina.com

**Xia Yan** received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Beijing Jiaotong University in 2012 and 2014, respectively. He has been pursuing his Ph.D. degree since 2020 at Southwest Jiaotong University. He is currently a senior engineer at China Railway Economic and Planning Research Institute Co., Ltd. His main research interests include optimization of rail transit power supply systems, power quality monitoring, and optimal control of electrified railways.



邓云川,1997年于西南交通大学获得学士学位,2003年于西南交通大学获得硕士学位,2020年于西南交通大学获得博士学位,现为中铁二院工程集团有限责任公司教授级高级工程师,主要研究方向为电气化铁路铁路牵引网电气参数研究、牵引供电系统

优化。

E-mail:dengdeng\_10@sina.com

**Deng Yunchuan** received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Southwest Jiaotong University in 1997, 2003, and 2020, respectively. He is currently a professor-level senior engineer at China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. His main research interests include electrical parameters of the traction grid and optimization of traction power systems in electrified railways.



黄可(通信作者),2013年于西南交通大学获得学士学位,2020年于西南交通大学获得博士学位,现为西南交通大学电气工程学院特聘副研究员,主要研究方向为电气化铁路供电系统建模和电磁兼容防护。

E-mail:a15882308995@163.com

**Huang Ke** (Corresponding author) received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Southwest Jiaotong University in 2013 and 2020, respectively. He is currently a specially appointed associate researcher in the School of Electrical Engineering at Southwest Jiaotong University. His main research interests include modeling of power systems, and electromagnetic compatibility protection in electrified railways.



梁靖坤,2017年于西南交通大学获得学士学位,2019年于美国雪城大学获得硕士学位,现为中铁二院工程集团有限责任公司电气化设计研究院工程师,主要研究方向为电气化铁路牵引供电系统建模。

E-mail:junklau@outlook.com

**Liang Jingkun** received his B.Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2017, and his M.Sc. degree from Syracuse University in 2019, USA. He is currently an engineer at the Electrification Design Institute of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. His main research interests include electrified railway traction power supply system modeling.



邓皓元,2024年于南方科技大学获得学士学位,现在新南威尔士大学攻读硕士学位,主要研究方向为电力系统暂态稳定性分析。

E-mail:edwinde024@gmail.com

**Deng Haoyuan** received his B.Sc. degree from Southern University of Science and Technology in 2024. He is currently pursuing his M.Sc. degree at the University of New South Wales. His main research interest includes transient stability analysis of power systems.