

地铁车辆再生制动能量利用率影响因素

沈小军, 曹 戈

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用情景分析法, 搭建了城市轨道交通车网仿真模型, 对发车间隔、上下行发车时间差、载客量、行车密度、路况地理状态等因素对再生制动能量利用率及牵引变电站牵引能耗的影响进行了分析, 给出再生制动能量利用率的主要影响因素. 通过再生制动能量利用率较低的工况仿真, 分析了站点列车制动电阻开启次数、低电压出现次数与该站点再生制动能量的利用以及电能质量间的作用关系. 以上海地铁线路运营时段的发车间隔为例, 运用仿真方法, 探讨了地面储能系统容量配置与城市轨道交通发车间隔的取值控制策略. 研究成果可为城市轨道交通节能提供理论指导.

关键词: 城市轨道交通; 列车再生制动; 能量利用率; 影响因素

中图分类号: U266.2

文献标志码: A

Factors Influencing the Utilization Rate of Regenerative Braking Energy of Urban Rail Transit Vehicles

SHEN Xiaojun, CAO Ge

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Finding out the factors influencing the utilization rate of regenerative braking energy of Urban Rail Transit (URT) vehicles is of great significance for improving the scientificity of energy-saving measures in URT operation. Based on a built simulation model, the scenario analysis method was used to quantitatively analyze the influencing factors of departure interval, time difference, passenger load, traffic density and road condition on regenerative braking energy utilization rate and traction energy consumption of traction substation. The main factors were given. The multi-condition simulation of the low regenerative braking utilization indicate that the opening times of train braking resistance and the occurrence times of low voltage at the station are strongly correlated with the utilization of regenerative braking energy

and power quality of the station. Taking the departure interval of multi-period operation of Shanghai metro line as an example, the simulation strategy of URT departure interval was discussed to guide capacity allocation of the stationary energy storage system. The results of this paper can provide reference for the formulation of energy-saving measures for URT.

Key words: urban rail transit (URT); regenerative braking of train; energy utilization rate; influencing factors

城市轨道交通已成为城市用电大户, 其节能减排问题日益突出, 当前迫切需要提升再生制动能量的利用率^[1]; 另外, 城市轨道交通车辆运行具有启停工况转换快、短时功率冲击大的特点, 需降低电流峰值冲击, 控制接触网电压波动, 以保障地铁车辆供电质量与运行安全. 开展基于地面储能的城市轨道交通车网系统动态能流控制相关技术研究, 保障城市轨道交通供电安全和质量, 是当前研究的热点^[2-3].

城市轨道交通车网能流交换与发车间隔、上下行发车时间差、载客量、行车模式、全天运行工况分布、路况地理状态直接相关^[4]. 高峰时段, 线路上运行的相邻列车数量多, 列车再生制动产生的电能易通过接触网被相邻列车吸收利用. 低峰时段, 列车数量少, 受电气距离的影响, 列车再生制动产生的电能大多不能通过接触网被相邻列车吸收利用, 只能采用电阻制动方式消耗. 采用最大或最小的原则配置储能系统容量、数量都是不科学的^[5]. 可见, 分析城市轨道交通车网能流分布概率特征, 获取动态能流的功率、能量的时频特征, 可为地面储能配置与控制策略制定提供所需的基础数据, 以保障地面储能系统科学、合理经济的配置及高效运行. 同时, 对指导城市轨道交通列车供电质量和供电可靠性评价, 具有重要的意义^[6-7].

收稿日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(E07/51677135)

第一作者: 沈小军(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新能源高效利用与储能技术、电网实景三维重构及其应用、状态感知与智能诊断等. E-mail: sxj999000@tongji.edu.cn

目前,城市轨道交通列车再生制动能量的影响因素研究,大致分为 3 类:①以双车为例,通过调整优化两车的运行时刻表(停站时间等),以最大化利用再生制动能量,实现节能效果;②以发车间隔和上下行发车时间差为主要切入点,基于某种算法建立列车节能模型;③分析网压上限值或超级电容控制特性,对地铁牵引供电系统各部分能量消耗,得出系统总再生能量制动利用率的变化.代表性的研究成果主要有陈焱等在建立不考虑再生制动的牵引能耗模型基础上,分析温度等属性对城市轨道交通牵引能耗的影响^[8];鲁永杰等在分析再生制动能量影响因素时,基于同一供电区内的所有列车出发和到达时间,建立一种列车调度方法改善传统遗传算法的再生制动能量利用效率^[9]. Adrián 等研究再生制动能量时,以发车间隔单一因素为出发点,建立动态多目标列车节能优化模型^[10];何礼光等开展了城市轨道交通在选取再生能量回馈系统时需要考虑的因素,着重分析了地面储能安装距离和列车制动策略对再生制动能量利用率的影响^[11].

文献资料分析结果表明,当前研究成果主要集中在发车间隔方面,尚未考虑诸多影响因素,且多因素之间的研究分析较少.在分析列车再生制动能量的影响因素时,除了要考虑列车时刻表及牵引供电系统对列车运行的影响外,还需考虑车辆特性(载重、车速等)以及线路条件(路况因素).另外,由于列车之间、列车与牵引网间均存在耦合,当有多列车运行时,需考虑多列车间的再生制动能量传递.搞清各种因素对再生制动能量及牵引能耗的影响并发现规律,以指导城市轨道交通再生制动能量的回收利用在工程中的应用.

鉴于此,本文采用情景分析法,开展了列车再生制动能量利用率诸多影响因素仿真量化分析.基于工况仿真结果,提出了客运站电能质量及附近列车再生制动失效相关联的特征参数,结合上海地铁全天运行工况下的发车间隔分布统计结果,讨论了指导地面储能系统容量配置条件下,城市轨道交通网仿真发车间隔的取值策略.研究成果可为城市轨道交通的制动能量回收利用,供电质量评估仿真工况条件下的设置,提供理论参考.

1 城市轨道交通车网仿真模型与再生制动能量利用率计算

1.1 城市轨道交通车网仿真模型与仿真参数

本文基于 PSCAD 软件建立的城市轨道交通系统车网联合仿真模型如图 1 所示.其中,牵引供电系统简化为等效电阻与理想电压源相串联的戴维南等效电路模型替代^[12],车辆模型采用功率源模型^[13],搭建的仿真系统包含 3 个牵引变电站、5 个客运站(其中 3 个客运站与牵引站是一体化的,客运站之间距离均为 1 km).本文采用最大加速启动、匀速运行、最大制动的牵引运行控制策略,上下行设置的车辆数视发车间隔设定.列车运行过程分为 3 个阶段:以 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的恒定加速度加速到最大速度,根据站间距及列车运行时刻表,以最大速度匀速运行一段时间,再以 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的减速度减速到 0 进站停车.仿真参数详见表 1.

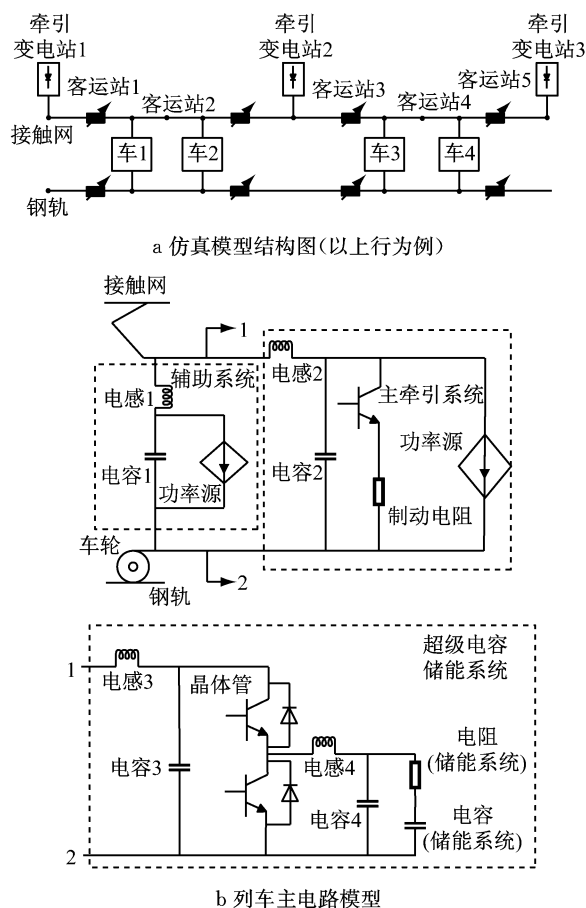


图 1 城市轨道交通系统车网联合仿真模型

Fig. 1 A co-simulation model for URT traction power system and vehicles

1.2 列车再生制动能量利用率计算

相关研究表明,再生制动能量利用率和牵引能耗是衡量列车节能运行的重要标志^[14].再生制动能量利用率表征列车再生制动情况,变电所牵引能耗反映车网系统的整体能耗情况.本文定义再生制动能量利用率 $\eta_{\text{re-used}}$ 为牵引供电系统列车利用了的再

表 1 单车模型的主要输入参数

Tab. 1 Input parameters of single train system based on PSCAD/EMTDC

参数名称	数值
列车自重/kg	220 000
乘客人均质量/kg	60
列车形式	四动两拖(基于功率源)
黏着系数	0.16
电制动力限值/kN	-320
电流限值/kA	4
辅助系统额定功率/kW	75
机电转换效率	0.97
滤波电感/mH	5
滤波电阻/ Ω	0.07
支撑电容/ μF	8 000
预充电时间/s	0.2
停站时间/s	50

生制动能量总和占多列车产生的再生制动能量总和的比率,即

$$\eta_{\text{re-used}} = \frac{\sum E_{\text{re}} - \sum E_{\text{re-unuse}}}{\sum E_{\text{re}}} \quad (1)$$

式中: E_{re} 为再生制动总能量; $E_{\text{re-unuse}}$ 为制动电阻吸收能耗,即未被利用的再生制动能量.其具体获取方法如下:功率源模块提供的电流与网压的乘积再进行积分,得到列车再生制动总能量.制动电阻吸收能耗的计算方法与再生制动总能量获取方法一致,此处不再赘述.

牵引变电站的能耗计算公式如下:

$$E_{\text{ss}} = \int_0^T P_{\text{ss}} dt = \int_0^T U_{\text{s}} I_{\text{s}} dt \quad (2)$$

式中: E_{ss} 为变电所能耗; P_{ss} 为变电所功率; U_{s} 为变电所母线电压; I_{s} 为变电所输出电流; T 为列车运行时间.其具体获取方法如下:在已建立的 PSCAD 仿真模型中,通过多表计模块实时测算变电所的电压电流,将二者乘积进行积分得到变电所的牵引功率,变电所处电流为正值即输出能量时的功率积分得到变电所在运行时间内的牵引能耗.

2 再生制动能量影响因素仿真分析

2.1 制动能量影响因素量化分析

理论分析发现,城市轨道交通再生制动能量利用受到列车运行图、列车发车间隔、上下行发车时间差、列车载重、最高车速、路况等多重因素影响,需要系统研究,本节详细量化分析了以上各因素对再生制动能量利用率及牵引变电站总能耗的影响.

2.1.1 发车间隔对再生制动能量利用率的影响

当发车间隔从 150 s 增加至 450 s 时,全线列车

总再生制动能量利用率及变电站牵引能耗变化曲线如图 2 所示.

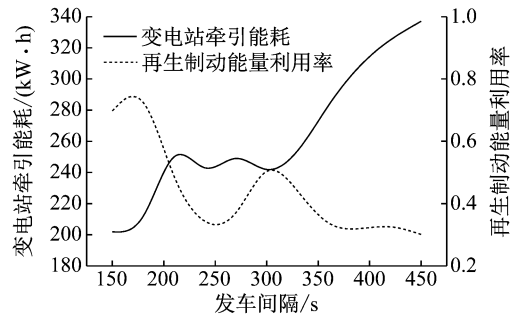


图 2 变电站牵引能耗及列车再生制动能量利用率随发车间隔的变化

Fig. 2 Energy consumption and regenerative rate of different headways

由图 2 可知,随着发车间隔的增大,列车再生制动能量利用率总趋势降低.这是由于发车间隔大,线上运行的列车数量少,则能够吸收再生制动能量的相邻列车数量少,影响了再生制动能量的馈用吸收量;而当发车间隔缩短时,线路上运行的车辆增加,不同列车牵引和制动工况的重叠率提高,则其再生制动能量利用率得到提高.对充分利用再生制动能量而言,发车间隔的选择需要结合具体的线路和运量变化进行讨论.

2.1.2 发车时间差对再生制动能量利用率的影响

为了分析上下行发车间隔时间差对容量配置的影响,本文分别选取 3 种典型发车间隔 150 s、240 s、360 s(分别代表高峰、平峰、低峰)的工况进行仿真,其上下行发车时间差分别取 0~150 s,再生制动利用率及牵引能耗随上下行发车时间差的变化曲线如图 3 所示.

分析上述 3 种发车间隔下变电站能耗及再生制动利用率随上下行发车时间差的变化图,可得变电站牵引能耗随上下行发车时间差呈波动性变化,波动范围很小,且能耗随发车间隔的增大而增大;再生制动能量利用率在 150 s 发车间隔时波动范围不到 10%,在 240 s 发车间隔时波动范围约 15%,在 360 s 发车间隔时波动范围约 25%.因此,在同一发车间隔下,选择合适的上下行发车时间差对系统总的再生制动能量利用率有一定影响,但其对再生制动利用率的影响小于发车间隔的影响.

仿真结果表明,发车时间差虽对再生制动能量利用率产生影响,但影响波动程度有限,且与发车间隔相关.这是因为在同一发车间隔下,全线同时处于牵引或制动工况的列车数量保持了相对稳定的数

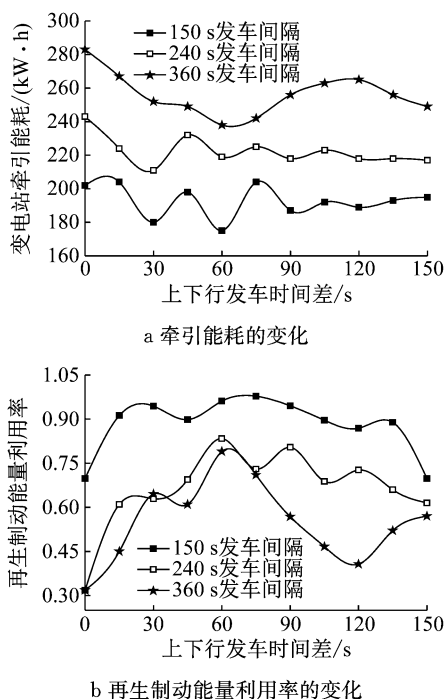


图 3 变电站牵引能耗及列车再生制动利用率随上下行发车时间差的变化
Fig. 3 Energy consumption and regenerative rate of different departure time

量,因此在同一发车间隔下,电能的消耗与网压电能的反馈相对稳定,趋于能量守恒. 最终,减弱了上下行发车时间差对再生制动利用率的影响. 但随着发车间隔增大,上下行发车时间差会对再生制动能量利用率的影响增大. 这主要是因为随着发车间隔的增大,造成了全线列车数量减少. 基于当前设定的仿真系统,全线列车可从 8 辆减少到 4 辆,同时处于制动的列车数量会出现较大的变化(4 辆减少到 2 辆),引起剩余再生能量及功率在较长发车间隔下产生较大的波动. 案例分析发现;基于案例仿真模型 360 s 的发车间隔,上下行时间差分别为 60 s 和 115 s 时,其再生制动能量利用率从 77%降低到 50%,而牵引能耗则从 238 kW·h 上升至 265 kW·h,两者的波动范围均相对较大.

2.1.3 载重及最高车速对再生制动能量利用率的影响

图 4、图 5 分别为乘客数从 100 人增至 1 800 人且列车最高行驶速度从 60 km·h⁻¹增至 85 km·h⁻¹时,全线列车总再生制动利用率及变电站牵引能耗变化曲线.

由图 4、图 5 可知,列车载员越多且运行速度越快,列车起停、制动调速时所造成的网压波动就越大,列车峰值功率及能耗也越大;再生制动能量利用

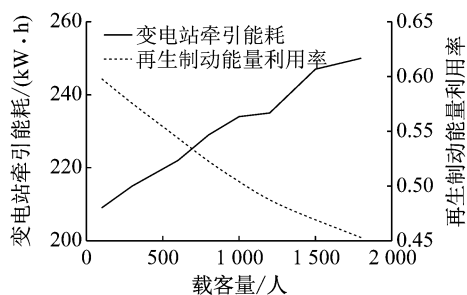


图 4 变电站牵引能耗及列车再生制动能量利用率随载客量的变化
Fig. 4 Energy consumption and regenerative rate of different passengers

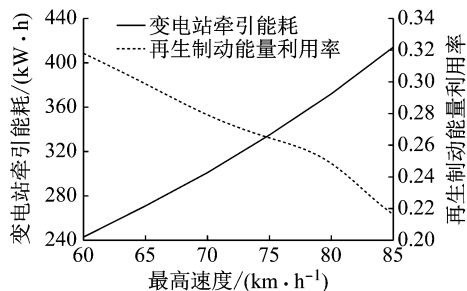


图 5 变电站牵引能耗及列车再生制动能量利用率随列车最高运行速度的变化
Fig. 5 Energy consumption and regenerative rate of different top speeds

率随列车重量及运行速度的增加而减少,变电站牵引能耗随列车重量及运行速度的增加而增加.

2.1.4 路况对再生制动能量利用率的影响

城市轨道交通路况可分平直轨道、坡道、弯道及隧道等,各路况具体的区别反映在列车行驶过程中产生的额外附加阻力,不同路况的附加阻力有相应的计算公式. 前述仿真研究均是基于平直轨道进行的,为验证不同路况对列车再生能量及牵引能耗的影响,本节以隧道为例,通过改变隧道长度的参数值(相当于改变其阻力计算公式),来模拟仿真不同路况. 仿真结果如图 6 所示.

由图 6 可知,牵引能耗和再生制动能量利用率均随着隧道长度的增加而增加,再生利用率的波动范围维持在 30%~45%之间,波动范围变化小于 15%.

2.2 仿真结果分析与讨论

发车间隔、上下行发车时间差、载重、最高速度及路况等因素对再生制动能量利用率的影响仿真统计结果如表 2 所示.

由表 2 可知,研究的诸多影响因素中,发车间隔对再生制动能量影响最为显著,是影响再生制动能

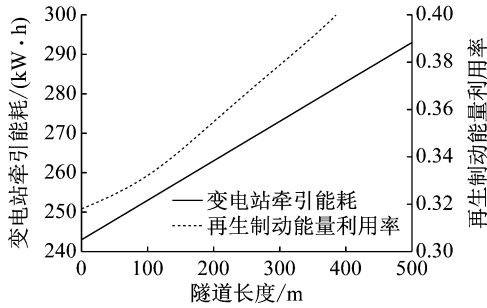


图 6 变电站牵引能耗及列车再生制动能量利用率随隧道长度的变化

Fig. 6 Energy consumption and regenerative rate of different tunnel lengths

表 2 影响因素对再生制动能量利用率影响仿真结果

Tab.2 Simulation results of influencing factors on utilization of regenerative braking energy

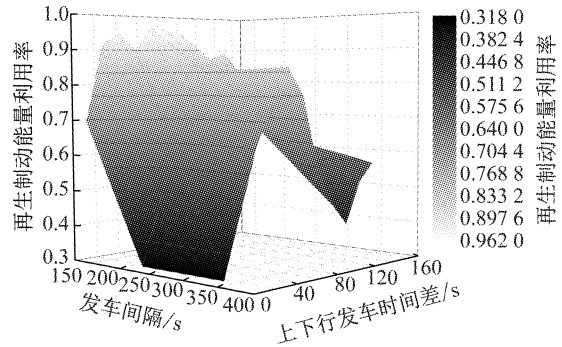
影响因素	再生制动能量利用率的波动范围/%
发车间隔	30~85
上下行发车时间差	受发车间隔的影响
载客量	45~60
最高速度	20~35
隧道长度	30~45

量利用的首要因素,不同发车间隔下的再生制动能量利用率在 30%~85%波动,变化幅度较大;不同载重下的再生制动能量利用率的变化范围为 45%~60%;最高车速下的再生制动能量利用率影响在 20%~35%变化;不同路况(特指不同长度的隧道)下的再生制动能量利用率变化范围为 30%~45%。

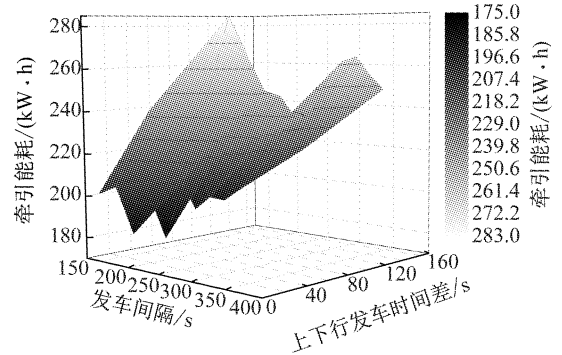
需要说明的是,上下行发车时间差对再生制动能量利用率的影响与发车间隔强相关.确定的发车间隔下,上下行发车时间差对系统总的再生制动能量利用率有一定的影响,但不同上下行发车时间差对再生制动能量利用率结果影响较小,随着发车间隔增大,上下行发车时间差对再生制动能量利用率的影响越大。

由仿真结果可得,上下行发车时间差与发车间隔有紧密的联系,研究发车间隔和上下行发车时间差两者共同作用对再生制动能量利用率和牵引能耗的影响非常必要.为此,研究中以发车间隔和上下行发车时间差作为自变量进行了仿真,统计其对再生制动能量利用率的影响.仿真得到的再生制动能量利用率(牵引站能耗)、发车间隔、上下行发车时间差影响的三维关系如图 7 所示。

由图 7 可知,基于本文的工况模型,无论何种发车间隔,再生制动能量利用率在上下行发车时间差 60 s 时,均达到峰值,此时牵引站总能耗几乎降到谷底.当其上下行发车时间差为 0,即上下行同步发车



a 发车间隔-上下行发车时间差-再生制动能量利用率



b 发车间隔-上下行发车时间差-变电站牵引能耗

图 7 发车间隔-上下行发车时间差-再生制动能量利用率(变电站牵引能耗)三维图

Fig. 7 Three dimensional graph of headway-departure time difference-regenerative rate and energy consumption

时,再生制动能量利用率会跌至谷底,同时牵引能耗会达到峰值,说明此工况下,列车基本处于牵引状态,再生制动失效严重,有必要制定相关措施予以优化,保障城市轨道交通的进一步节能运行.研究制动能量回收利用评估时,推荐以上下行同步发车的工况作为代表.需要指出的是,当系统的发车间隔固定及线路参数确定时,全线列车数随之确定,总会存在一个上下行时间差,使得全线同时制动的列车数最多,且发生再生制动失效的概率最低.这个时间差与仿真工况的设置条件存在关联.案例分析中的 60 s 是与仿真参数相对应的。

3 发车间隔仿真取值策略

以上海地铁运营的 15 条线路(浦江线及磁悬浮列车除外)为例,通过对地铁线路列车全天运行图统计分析,探讨总结具有代表性的列车运行图(发车间隔)仿真数据的取值策略.图 8 为上海地铁 15 条地铁线路在工作日的发车间隔及早、晚、平、低峰各时段持续时间的统计分析结果。

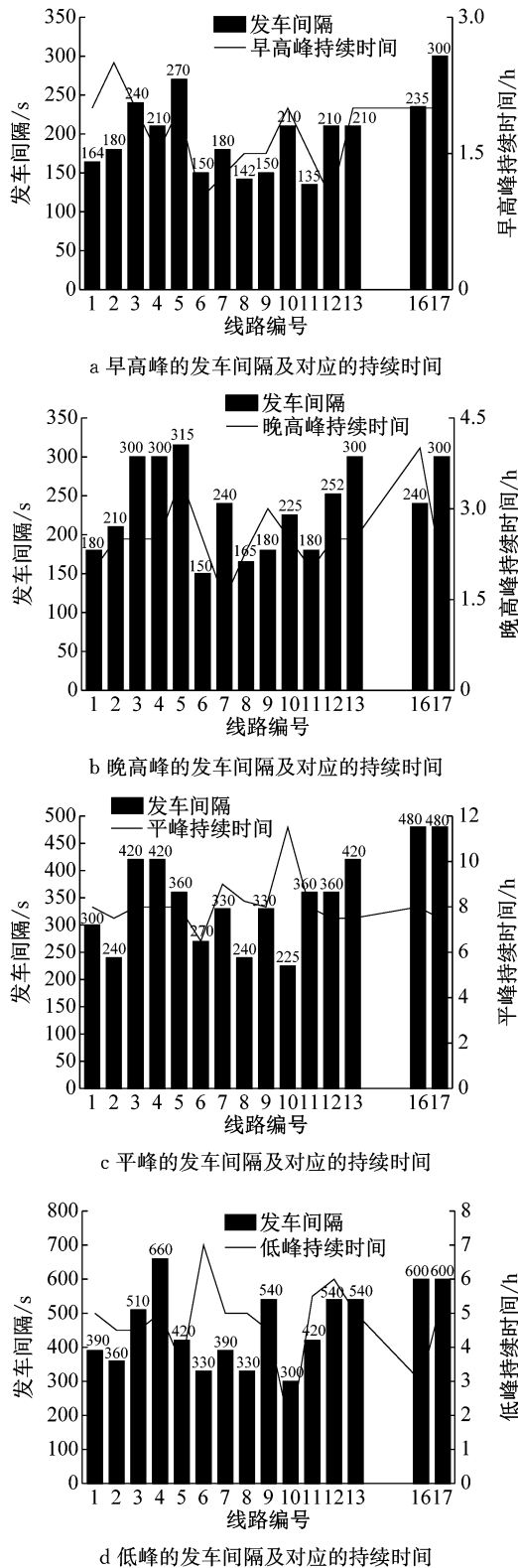


图 8 上海地铁线路平峰及低峰的发车间隔及持续时间
Fig.8 Headways and duration of morning/evening rush hour and off/low-peak time

由图 8 可知,上海地铁运营线路早、晚高峰发车间隔时间较短(分别为 200 s 和 240 s 左右),且持续时间较短(约 1~3 h),平峰及其余时间段的发车间

隔时间较长(分别为 350 s 和 460 s 左右),且持续时间很长(约 5~8 h).为了量化得到的数据并用于仿真分析,将上述 4 个时段的平均持续时间及平均发车间隔的统计计算结果列于表 3.

表 3 早、晚、平、低峰时段的平均持续时间及平均发车间隔
Tab.3 Average duration and headways of morning/evening rush hour and off/low-peak time

时段	平均持续时间/h	平均发车间隔/s
早高峰	1.7	204
晚高峰	2.5	236
平峰	8.1	349
低峰	4.7	462

从表 3 统计结果可知,上海地铁线路全天运行时间为 17 h 左右(5:30~22:30),早、晚高峰平均持续时间之和约 4.3 h,占总运行时间的 1/4;早、晚高峰时间发车间隔较短,再生制动能量利用率较大.根据表 3,可取 200 s 和 240 s 分别代表早、晚高峰发车间隔时间.而其余时间段发车间隔低于平峰时间段,两者的持续时间占总运行时间的 3/4,再生制动能量利用率均较低,可取 360 s 和 480 s 代表平峰及其余时间段的发车间隔.

若分别以 200、240、360、480 s 这 4 种发车间隔代表某线路的早、晚、平、低峰时间,根据表 3 的统计结果,所有列车在对应发车间隔时间内经过客运站次数如表 4 所示.

表 4 不同发车间隔时间段下对应的列车经过某客运站总次数
Tab.4 Headways and the number of trains passing by each station of morning/evening rush hour and off/low-peak time

时段	发车间隔/s	某站点经停的列车次数/次
早高峰	200	31
晚高峰	240	38
平峰	360	47
低峰(其余时间)	480	61
总计		177

由表 4 可知,一条线路列车全天运行工况下经过某客运站的总次数约为 177 次,其中早、晚高峰时,某客运站的车辆经过次数约为 69 次;虽然平峰和低峰时间段发车间隔较长,但其在全天运行工况下持续时间长,列车经过某个客运站总次数却达到了 108 次.由此可得,列车发车间隔越长,且其持续时间占全天总运行时间的比例相对越大,则其中一个客运站全天经停的列车次数就越多.

某时段的平均持续时间占全天总运行时间的比例越大,则该时间段内列车运行图就越有代表性.基于实际地铁列车全天运行图的统计分析结果表明,

平峰时间段的持续时间远大于其他各时间段,且再生制动能量利用率较低,此阶段内的列车运行图仿真数据具有较强的借鉴意义.所以后续进行城市轨道交通多种仿真工况的研究时,可取平峰时段的发车间隔作为列车运行图输入.这种“发车间隔取偏大值”的策略,可避免因极大或极小的发车间隔取值而造成的不平衡差异,并且可用于指导后续地面储能容量配置,避免了极大或极小方法造成的投资过大或能量浪费,具有工程合理性.当然,能量评估仿真研究中发车间隔的选择还需结合具体的储能技术及其造价予以设定优化.

4 低再生利用率工况细化分析

上文已得到影响再生制动能量利用率及变电站牵引能耗的重要因素,再生制动能量利用率较低表明再生制动失效严重,是工程上需采取措施予以治理的对象,为此选择再生制动能量利用率低于 35% 的发车间隔工况开展进一步仿真分析.

车网系统结构具有时空变化特性,有必要从车网的动态结构、站点位置等方面深入研究.一方面,列车运行图(主要指发车间隔)从时间上影响多列车牵引制动的能量传递时刻,同时决定列车制动电阻开启与否.列车运行至与之相邻的客运站时,制动电阻一旦开启表明该站附近存在再生制动失效情况;另一方面,全线列车运行时,车网的空间结构动态变化,各站点网压也会随之波动,全线列车运行至某一站点时可能会导致该站点的网压偏低.全线车网结构从空间位置上决定了各客运站的网压分布情况,网压过低将导致电能质量过差,影响供电系统的安全.由此可见,车辆制动电阻开启状况与各客运站的网压分布情况、客运站列车再生制动能量利用及电能质量具有相关性.

鉴于此,仿真统计了全线各辆车制动电阻开启时列车所处位置和运行时网压波动较大的地点,以及不同发车间隔下(上下同步发车)各客运站跌落到的最低电压,结果如图 9 所示.

由图 9 可知,再生制动能量利用率较低(35%以下)的几种工况,列车经过编号为 2、4 的客运站时制动电阻开启次数与最低电压出现次数之和均相对较多.表明在不同的发车间隔下,2、4 两站再生失效严重,同时 2、4 站最低电压相对其他客运站跌落较大,均跌破了 1.2 kV,电能质量较差.列车制动电阻开启次数及客运站最低电压出现次数与该站点再生制

动能量的利用及电能质量具有强关联关系,其和值越大,该站点的最低电压越低,则表明该站的再生失效严重,电能质量较差.制动电阻开启次数与最低电压出现次数之和具有表征客运站再生制动能量利用率和电能质量的能力,可作为再生制动能量利用率和电能质量的表征参数.

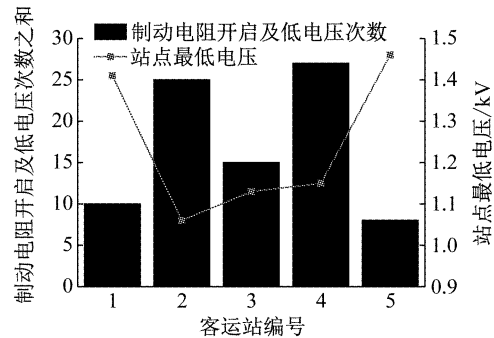


图 9 客运站的电能质量情况

Fig.9 Power quality of passenger stations

5 结论

(1) 再生制动能量利用率的波动受发车间隔与上下行发车时间差两个因素的影响最为显著.上下行发车时间差对再生制动能量利用率的影响随发车间隔的变化而变化;发车间隔短时有利于再生制动能量的充分利用;选取合适的上下行发车时间差亦有利于提高系统的再生制动能量利用率;其他诸如最高车速、载重及路况因素对再生制动能量利用率的影响较小,再生制动能量利用率的波动范围均在 15% 以内.

(2) 以上海地铁线路为例,统计计算了列车发车间隔,得到全天运行工况城市轨道交通仿真模型 4 种典型的发车间隔,用以模拟实际线路早、晚、平、低峰 4 种工况;推荐采用“发车间隔取偏大值”和上下行同步发车的仿真策略,其具体取值可结合储能造价予以优化设定,采用平峰时刻的发车间隔仿真指导地面储能定容相关问题具有较好的技术经济性.

(3) 列车制动电阻开启次数及该站最低电压次数之和与该站点再生制动能量的利用及电能质量具有强的关联关系.经停某一个客运站的所有列车制动电阻开启次数与该站最低电压次数之和越大,该站点的最低电压越低,该站的再生制动失效越严重,电能质量较差.列车制动电阻开启次数与该站最低电压次数之和具备表征该站点再生制动及电能质量的能力,可用于指导城市轨道交通动态能流管理地面装置的选址.

参考文献:

- [1] YANG Z H, YANG Z P, XIA H, *et al.* Brake voltage following control of supercapacitor-based energy storage systems in metro considering train operation state [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8):6751.
- [2] 冯瑜, 陈绍宽, 冉昕晨, 等. 考虑再生制动能利用的城市轨道交通列车节能运行优化方法研究 [J]. *铁道学报*, 2018, 40(2):15.
FENG Yu, CHEN Shaokuan, RAN Xinchun, *et al.* Energy saving operation optimization of urban rail transit trains through the use of regenerative braking energy [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2018, 40(2):15.
- [3] KHODAPARASTAN M, MOHAMED A A, BRANDAUER W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(8):2831.
- [4] 夏欢, 杨中平, 杨志鸿, 等. 基于列车运行状态的城市轨道超级电容储能装置控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(21):20.
XIA Huan, YANG Zhongping, YANG Zhihong, *et al.* Control strategy of supercapacitor energy storage system for urban rail transit based on operating status of trains [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(21):20.
- [5] 陈俊宇, 胡海涛, 王科, 等. 一种考虑列车运行图的高速铁路牵引供电系统再生能量评估方法 [J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(1):102.
CHEN Junyu, HU Haitao, WANG Ke, *et al.* A method for evaluating regenerative energy of traction power supply system of high speed railway considering train working diagram [J]. *China Railway Science*, 2019, 40(1):102.
- [6] AHMADI S, DASTFAN A, ASSILI M. Energy saving in metro systems: simultaneous optimization of stationary energy storage systems and speed profiles [J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2018, 8(1):78.
- [7] ARBOLEYA P, MOHAMED B, EL-SAYED I. DC railway simulation including controllable power electronic and energy storage devices [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5):5319.
- [8] 陈焱, 毛保华, 柏赟, 等. 列车属性对城市轨道交通牵引能耗的影响及列车用能效率评价 [J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(2):99.
CHEN Yao, MAO Baohua, BAI Yun, *et al.* Impact of train characteristics on traction energy consumption of urban rail transit and evaluation on train energy efficiency [J]. *China Railway Science*, 2016, 37(2):99.
- [9] 鲁永杰. 地铁牵引系统再生制动能量吸收及利用方法研究 [J]. *中国测试*, 2018, 44(8):113.
LU Yongjie. Study on method of regenerative braking energy absorption and utilization in metro traction system [J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(8):113.
- [10] ADRIÁN F R, ANTONIO F C, ASUNCIÓN P, *et al.* Real time eco-driving of high speed trains by simulation-based dynamic multi-objective optimization [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2018, 84:50.
- [11] 何礼光, 何海华. 再生制动能量回馈系统的能量回馈效率影响因素分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2017, 20(6):85.
HE Liguang, HE Haihua. Analysis of factors affecting energy feedback efficiency of regenerative braking energy feedback system [J]. *Urban Mass Transit*, 2017, 20(6):85.
- [12] 荀径, 唐涛, 宋晓美, 等. 再生制动条件下的城市轨道交通列车节能驾驶综合模型 [J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(1):104.
XUN Jing, TANG Tao, SONG Xiaomei, *et al.* Comprehensive model for energy-saving train operation of urban mass transit under regenerative brake [J]. *China Railway Science*, 2015, 36(1):104.
- [13] 沈小军, 陈胜, 张翼, 等. 考虑功率-容量约束的城市轨道交通车载超级电容阵列配置方法 [J]. *中国铁道科学*, 2013, 34(2):118.
SHEN Xiaojun, CHEN Sheng, ZHANG Yi, *et al.* Configuration method for the onboard super-capacitor bank of urban rail transit considering power and capacity constraints [J]. *China Railway Science*, 2013, 34(2):118.
- [14] LIU P, YANG L, GAO Z, *et al.* Energy-efficient train timetable optimization in the subway system with energy storage devices [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(12):3947.