

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2014.03.005

# 超级电容储能装置 容量配置影响因素分析

王彬<sup>1</sup> 杨中平<sup>1</sup> 林飞<sup>1</sup> 史京金<sup>2</sup> 赵炜<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院 北京 100044; 2. 北京地铁运营技术研发中心 北京 102208)

**摘要** 在城轨交通系统中加入超级电容储能装置,可有效抑制列车的再生制动失效问题。为模拟加入储能装置后城轨供电网络的能量流动情况,从全局、动态的角度搭建地面式超级电容储能系统仿真平台,针对国内某地铁线路进行仿真分析,探讨发车间隔、上下行发车时间差以及超级电容控制特性对容量配置结果的影响,并最终确定一套较为合理的容量配置方案。

**关键词** 城市轨道交通;地面式;超级电容;再生制动;容量配置;影响因素

中图分类号 U266.2;U264.91<sup>+3.4</sup> 文献标志码 A  
文章编号 1672-6073(2014)03-0018-05

在全球倡导保护环境、防止温室效应的今天,城轨交通节能、环保的优点越来越受到人们的重视。列车再生制动能量可以供给同一供电区的其他处于牵引状态的列车利用,从而降低列车运行能耗。但当列车再生制动时,产生的能量若无邻近的列车吸收,则可能造成直流网压的抬升;当电网电压抬升超过允许网压波动上限时,就可能导致再生失效的发生。近年来,随着飞轮、电池、超级电容(SC)等储能装置技术的快速发展,如何利用储能装置来解决城轨列车再生制动失效的问题,受到了世界轨道交通界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

超级电容储能相比其他储能方式,具有循环寿命长、功率密度高、对环境无污染等优点,在国际上已逐步得到推广应用<sup>[4-6]</sup>。超级电容与城轨交通区间运行时间短、启停频繁、短时间电压尖峰明显等特点具有很好的匹配性,因此将是城市轨道交通领域中储

能元件的一个重要选择。如何对其进行合理的容量配置,是地面式超级电容储能系统的一个重要课题<sup>[7-9]</sup>。笔者基于搭建的超级电容储能系统仿真平台,从牵引变电所处的剩余再生制动能量角度出发,探讨了可能对储能装置容量配置造成影响的因素,并基于对这些影响因素的分析,得到一个较为合理的容量配置方案。

## 1 影响容量配置的主要因素

图1所示为列车处于牵引、制动工况时直流线网的能量流动情况。当列车制动时,列车的再生能量一部分供给邻近列车牵引利用,剩余的再生能量被超级电容吸收;当列车牵引时,超级电容释放能量供给列车牵引利用,其余能量由邻车及牵引变电所提供。

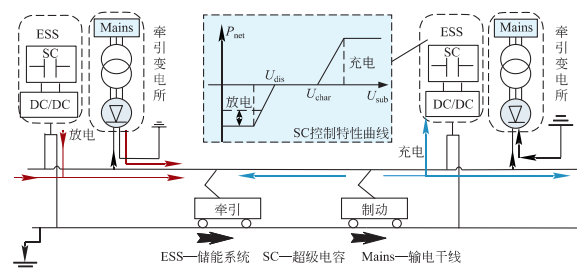


图1 列车牵引制动时直流线网能量流动

观察SC控制特性曲线, $U_{char}$ 与 $U_{dis}$ 分别表示充电与放电阈值。当检测到变电所处的线网电压 $U_{sub}$ 处于 $U_{dis} \sim U_{char}$ 范围内时,储能装置无动作;当检测到 $U_{sub}$ 高于 $U_{char}$ 时,储能装置进入充电状态,吸收线网上的剩余再生制动能量,抑制线网电压抬升;当检测到 $U_{sub}$ 低于 $U_{dis}$ 时,储能装置进入放电状态,此时将超级电容中储存的能量释放到直流电网中供给其他处于牵引状态的列车利用,从而达到节能的效果。

目前,地铁多采用双边供电的方式,如果要简单地

收稿日期:2013-06-05 修回日期:2013-07-25

作者简介:王彬,男,硕士研究生,从事城市轨道交通储能研究,12121547@bjtu.edu.cn

基金项目:北京市科委课题(Z111100059411009)

设计某变电所的超级电容容量,容易想到的是:当上、下行两列车同时进站(假如变电所设置在站内)时,计算此时中间变电所处剩余的再生制动功率及再生制动能量,作为容量配置的依据。上面的设计方法显然欠妥,还有一些其他因素应考虑。其一,城市轨道交通系统经常处于多列车运行工况,此时车与车、车与网、车与超级电容之间均存在能量交互过程,能量交互会影响供电网络上剩余再生能量的分布,继而影响对储能装置的容量配置;其二,超级电容控制特性决定了储能装置充放电的动作阈值,直接影响了储能装置吸收/释放的剩余再生制动功率及能量,从而对以剩余再生功率及能量作为设计依据的容量配置结果造成影响。下面基于仿真平台,在剩余再生能量全部被储能装置吸收的前提下,研究上述因素对超级电容储能装置容量配置的影响。

## 2 超级电容储能系统仿真平台

笔者在 Matlab 环境下,从全局、动态的角度,建立了一套适用于城市轨道交通地面式超级电容储能系统的仿真平台。该平台构成及流程见图 2,包括列车运行模块 TPS、直流线网潮流仿真模块 DC-RLS、储能系统模块 ESS。通过仿真平台,最后能得到每个变电所超级电容的充放电功率及储能量,作为超级电容储能装置容量配置的依据。

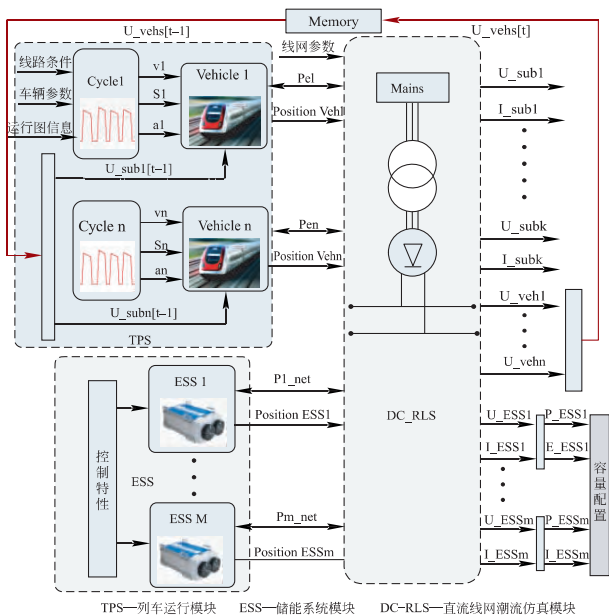


图 2 超级电容储能系统仿真平台构成及流程

### 2.1 列车运行模块(TPS)

TPS 模块的输入包括线路条件、车辆参数及运行

图信息。线路条件是指线路的坡度、曲线等固有条件,车辆参数指列车负载、辅助功率及牵引制动特性曲线,运行图则提供车站分布信息及列车的运行/站停时间。单车牵引计算流程如图 3 所示,通过这个模块能得到列车的速度  $v$ 、距离  $S$ 、电功率  $P_e$  等数据。

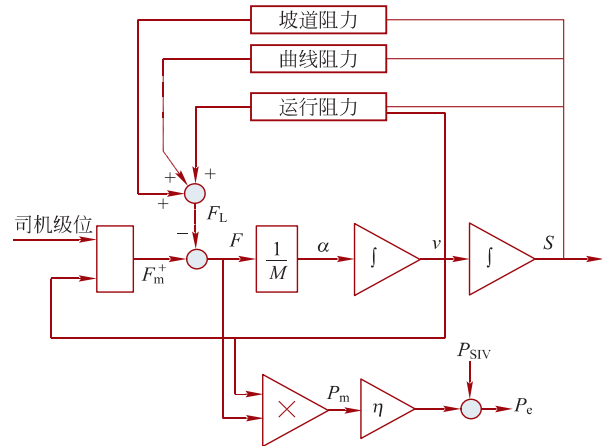


图 3 TPS 模块流程

基于前面的单车计算结果,推导可得到在不同发车间隔时上/下行线上所有列车的分布情况及在受电弓处的功率大小。

### 2.2 直流线网潮流仿真模块(DC-RLS)

DC-RLS 模块的主要功能是模拟出在整条线路上多列车时的运行工况,并通过潮流解析实时得到每个变电所电压电流信息及超级电容的充放电功率信息。下面介绍网络结构中主要部件的建模原理。

#### 2.2.1 列车

在列车建模中,设置了再生电流限制器(见图 4),起到限制列车受电弓处再生电流的作用。

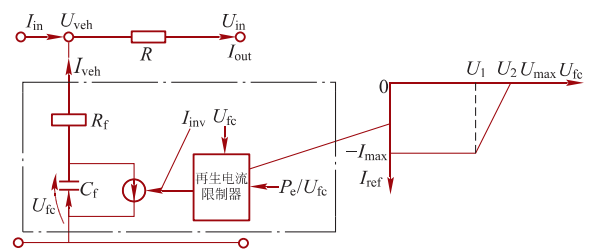


图 4 列车模型

#### 2.2.2 牵引变电所

牵引变电所为二极管不控整流,电流流向具有单向性(见图 5)。为了模拟其单向性,当变电所输出电流  $I_{sub}$  为正向时,开关 S1 闭合;当输出电流  $I_{sub}$  为负向时,开关 S1 断开。

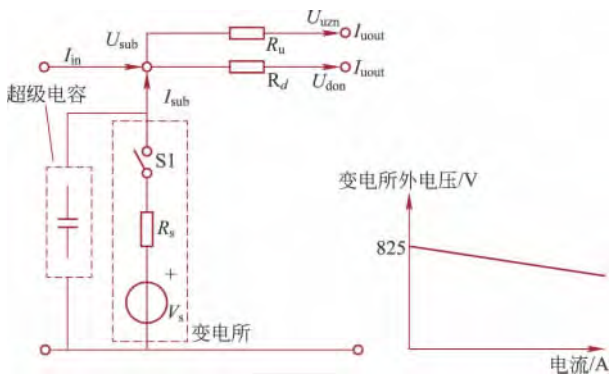


图5 牵引变电所模型

### 2.3 储能系统模块(ESS)

超级电容储能系统模型由双向DC/DC变换器和超级电容器组成(见图6)将二者统一等效为功率源,采用一定的控制特性,实现对超级电容储能系统的充放电功率控制。

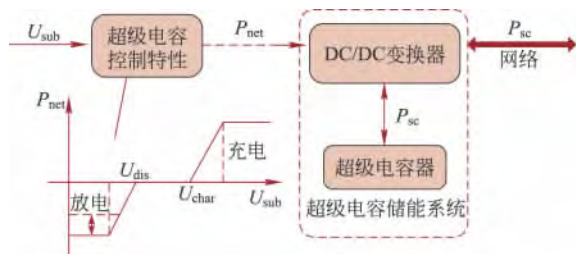


图6 超级电容储能系统模型

仿真可测量得到超级电容吸收/释放的最大充放电功率  $P_{sc,max}$  通过  $E_{sc} = \int P_{sc} dt$  可得到超级电容的最大储能  $E_{sc,max}$  由  $P_{sc,max}$  与  $E_{sc,max}$  可确定储能装置的功率等级及最大储能 这将作为容量配置的主要依据。下面将以国内某实际地铁线路为例进行仿真分析,对其全线进行超级电容容量的配置设计。

## 3 地铁线路的实例仿真

### 3.1 仿真条件

国内某地铁线路共有22个车站、13个牵引变电所。

1) 列车参数:列车编组3M3T;车型B1;负载工况,AW3为312.9t;额定电压DC750V;SIV功率160kVA×2;列车最高速度80km/h;列车基本阻力  $R = (381.549 + 4.44v + 0.067v^2) \times 9.8(N)$  其中  $v$  为列车速度(km/h)。

2) 供电网络参数:变电所空载电压825V;变电所等效内阻0.07Ω;接触网阻抗0.007Ω/km;钢轨阻抗0.009Ω/km;受电弓阻抗0.015Ω;发车间隔,600s(低峰)。

### 3.2 仿真结果

图7为经过TPS牵引计算得到的上行线单列车的速度、距离、电功率曲线;图8为通过DC-RLS潮流解析得到的牵引变电所的电压、电流曲线;图9表示经仿真得到的超级电容充放电功率及储能变化,超级电容最大储能  $E_{sc,max}$  是指在单充电周期内(多个连续充电周期也认为单充电周期)最大的储能增值;图10所示为仿真得到的全线牵引变电所站1~站13配置的超级电容充放电功率及储能。

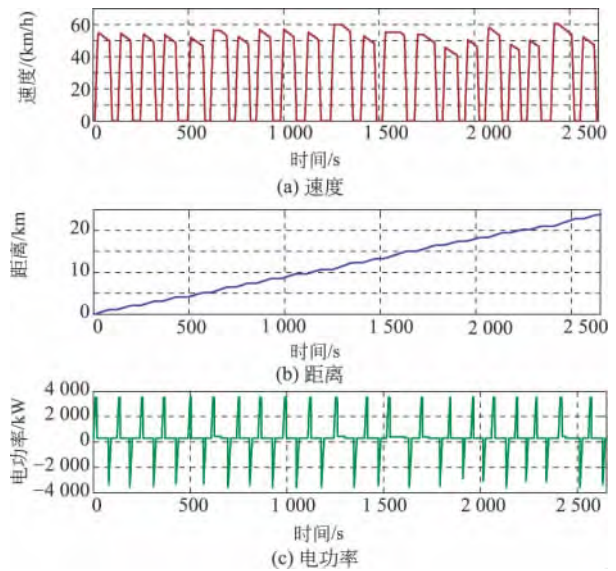


图7 上行线列车的速度、距离、功率曲线

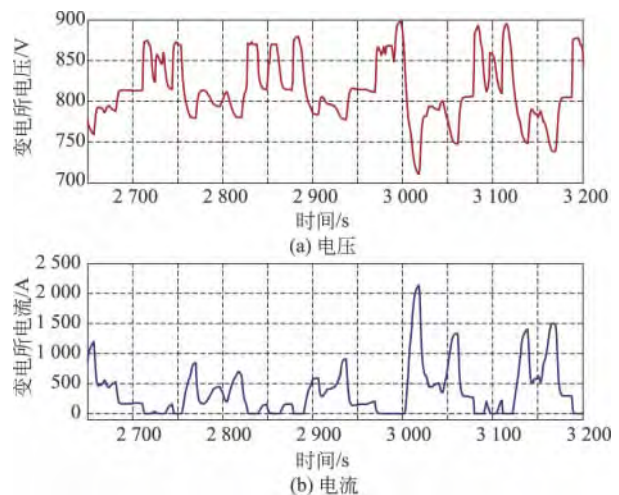


图8 上行线变电所的电压、电流

### 3.3 容量配置

选用超级电容Maxwell模块(BMOD0063P125)其电气参数如下:容值63F;额定电压125V;质量60.5kg;储能136.7W·h;最大持续电流240A;最大峰值电

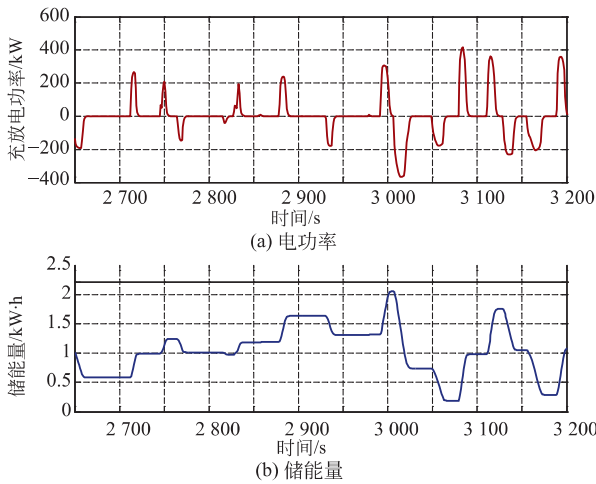


图9 超级电容充放电功率及储能

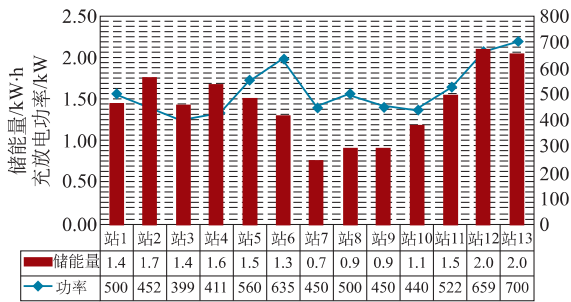


图10 牵变所超级电容最大充放电功率及储能

流, 1 800 A; 最大串联电压, 1 500 V; 体积, 619 × 425 × 265 (mm<sup>3</sup>)。

为保证超级电容能够长期稳定工作, 其端电压不能太低, 变化范围一般在最大电压的 50% ~ 100%。超级电容最大端电压取 500 V, SOC (state of charge) 工作范围取 0.25 ~ 0.95, 容量配置为

$$N_{\text{串}} = 500 / 125 = 4 \quad (1)$$

$$E_{\text{cap}} = E_{\text{sc}} / 0.7 \quad (2)$$

$$N_{\text{并}} = \left\lceil \frac{E_{\text{cap}}}{N_{\text{串}} \times \frac{1}{2} CU^2} \right\rceil \quad (3)$$

满足

$$I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{sc max}}}{0.5 U_0} \leq I_{\text{sc max}} \quad (4)$$

式中:  $E_{\text{cap}}$  表示超级电容储容量, 即能储存的最大能量;  $E_{\text{sc}}$  表示超级电容可用的储能。

以站 1 为例, 其超级电容的配置结果是 4 串 × 4 并, 可用储能 1.53 kW · h, 最大电压 500 V, 模块质量 968 kg, 模块体积 1.12 m<sup>3</sup>。

上述容量配置结果是建立在低峰 (固定发车间

隔)、上下行同时发车、一定的充放电控制特性的前提下仿真得到的, 而在实际情况中, 列车的运行状态及供电网络的多变性会对容量配置结果造成影响, 所以有必要对相关的影响因素进行仿真分析。

#### 4 容量配置的影响因素

根据本文第 1 节的分析, 影响容量配置的因素主要来源于供电网络的拓扑变化及超级电容本身的控制特性两方面, 而发车间隔与上下行发车时间差是影响网络拓扑的直接因素, 下面分别探究发车间隔、上下行发车时间差、超级电容控制特性对容量配置的影响。

##### 4.1 发车间隔

当发车间隔分别为 600 s (低峰)、300 s (平峰)、120 s (高峰) 时, 观察全线各变电所处应配置超级电容的储容量数据, 如图 11 所示。

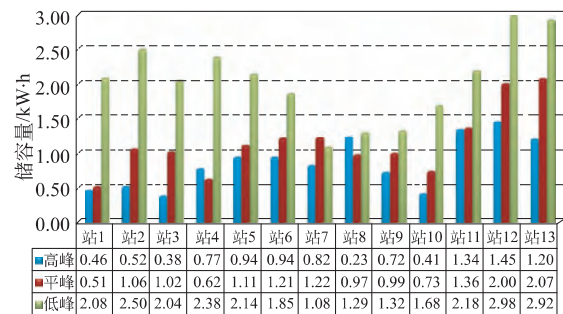


图11 不同发车间隔下的超级电容储容量

随着发车间隔变小, 全线上邻车间的能量交互愈加频繁, 供电网上被超级电容吸收的剩余再生制动能量减少, 应配置超级电容的储容量变小。对本线路而言, 随着发车间隔变大 (高峰—平峰—低峰), 应配置的超级电容储容量整体上也呈变大的趋势。

##### 4.2 上下行发车时间差

为了研究发车时间差对容量配置的影响, 分别针对低、平、高峰进行仿真。以低峰为例, 其上下行发车时间差分别取 0、200、400 s, 仿真得到的超级电容储容量如图 12 所示。

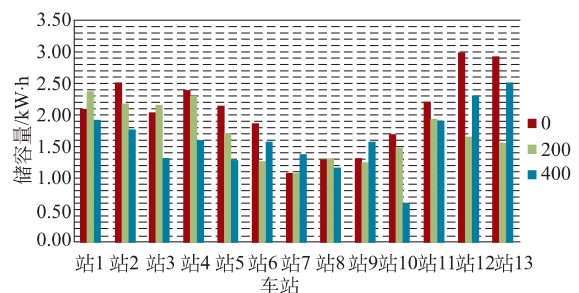


图12 低峰时不同发车时间差下的储容量

上下行发车时间会影响同一时刻上/下行列车制动工况的重叠率(即多车发生同时制动的概率),从而影响超级电容储容量的取值。对本线路而言,观察仿真结果,以发车时间差0的储容量为基准,随发车时间差的变化,其储容量的增量波动均保持在20%以内。笔者还对平峰、高峰进行了仿真,发现对于不同的发车间隔,不同的发车时间差可能会导致某些站的超级电容储容量取值出现波动,但对全线超级电容储容量的大小分布影响不大。

### 4.3 超级电容控制特性

为了研究超级电容控制特性对容量配置的影响,分两组进行仿真。第一组,固定放电阈值为720V,比较不同充电阈值下的超级电容储容量,仿真结果见图13;第二组,固定充电阈值870V,比较不同放电阈值下的储容量,仿真结果见图14。

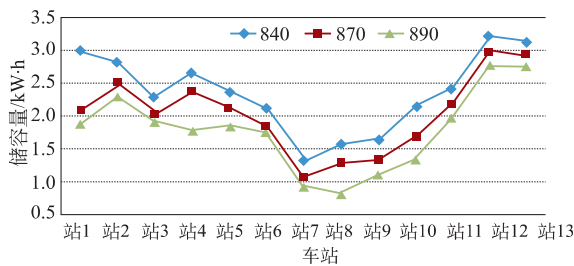


图13 不同充电阈值下的超级电容储容量

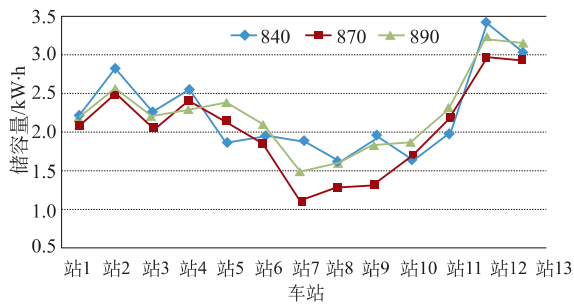


图14 不同放电阈值下的超级电容储容量

超级电容的充电阈值决定了超级电容开始充电的动作值,而超级电容的储容量是由充电时所吸收的最大储能确定的,因此充电阈值与储容量之间有直接的影响关系。观察图13,发现随着充电阈值变大(840→870→890)相应的超级电容储容量变小,与理论相符。

超级电容放电阈值的改变,会影响堆积在直流线路网上的剩余再生制动能量,间接影响超级电容的储容量取值。观察图14,发现随着放电阈值变小(800→780→760),大多数站的超级电容储容量呈现先减小后增大的

趋势;当放电阈值取780V时,取得较小的储容量。

### 4.4 全线容量配置方案

通过对容量配置影响因素的分析,以低峰时的超级电容储容量作为容量配置的依据。考虑由于上下行发车时间差等因素可能带来的储容量取值波动,在原来储容量的基础上增加20%的裕度;根据超级电容控制特性,充、放电阈值分别取870和780V。全线超级电容的容量配置方案如表1所示。

表1 全线超级电容容量配置方案

变电所站	串	并	质量/kg	体积/m <sup>3</sup>	储能量/(kW·h)
站1	4	5	1 210	1.39	2.73
站2	4	6	1 452	1.67	3.28
站3	4	5	1 210	1.39	2.73
站4	4	6	1 452	1.67	3.28
站5	4	5	1 210	1.39	2.73
站6	4	5	1 210	1.39	2.73
站7	4	3	726	0.84	1.64
站8	4	3	726	0.84	1.64
站9	4	3	726	0.84	1.64
站10	4	4	968	1.12	2.19
站11	4	5	1 210	1.39	2.73
站12	4	7	1 694	1.95	3.83
站13	4	7	1 694	1.95	3.83

## 5 结论与展望

笔者根据城市轨道交通供电系统的结构特点,建立了地面式超级电容储能系统仿真平台,并以国内某条地铁线路为例,通过仿真对其超级电容储能装置的容量配置影响因素进行了分析,最后确定了一套较为合理的容量配置方案,结论如下:一是随着发车间隔变大,超级电容的储容量整体呈增大的趋势;二是上下行发车时间差会导致储容量取值的波动,波动增量一般低于20%;三是超级电容储容量随充电阈值增大而减小,当放电阈值取780V时,取得较小的储容量。

该容量配置方案是以每个站均设置超级电容储能装置作为前提条件得到的。在实际应用中,若每站均设置超级电容,则装置成本将非常高,所以这种方案并不理想。考虑建立能够表征节能率、网压波动与装置成本的目标函数,以高节能、低波动与低成本为目标,对全线超级电容的安装位置及其储容量进行优化算法设计,最终得到最优的超级电容安装位置及容量,将是本课题今后研究的主要内容。

(下转第26页)

参考文献

- [1] 霍宏艳,黄吉莹. 轨道交通无线通信系统电波覆盖特性的研究[J]. 无线通信技术 2007(7):36-44.
- [2] 刘建宇,胡晓红. GSM-R系统的场强覆盖预测[J]. 铁道通信信号 2005(3):31-33.
- [3] 唐文可. 控制无线列调场强覆盖 提高无线列调系统运用质量[J]. 铁道通信信号 2011(9):65-66.
- [4] GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京:中国计划出版社 2003:117-127.
- [5] 闫鹏. 轨道交通 PIS 中车地无线通信的研究[J]. 铁路计算机应用 2010,19(2):29-51.

(编辑:郭洁)

## Field Coverage Analysis of Special Wireless Communication System in Rail Transit

Yue Xiaodong

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: Wireless communication is an important guarantee for internal operation management as well as business of urban rail transit. It is an important research area of wireless communication about how to calculate the field coverage of wireless communication system reasonably in the condition of ensuring the quality of wireless communications at the same time. Only by adopting reasonable methods for wireless coverage can we avoid chaos of the wireless communication system, repetitive construction and waste of resources. Through the analysis of the architecture form of stations, tunnels, platforms as well as the stations' hall of Ningbo Metro Line 1, the wave path in typical interval tunnel, platform and the station hall, its coverage model and path loss were established. On this basis, the key point level that meets the condition of wireless coverage could be obtained. The research could provide a guidance for future construction of underground stations and their interval coverage.

Key words: urban rail transit; special wireless communication; field coverage; coaxial cable; antenna

(上接第22页)

参考文献

- [1] Barrero R, Tackoen X, Van M J. Energy savings in public transport[J]. IEEE Veh Technol Mag 2008 3(3):26-36.
- [2] Ogasa M, Taguchi Y. Power flow control of trolley hybrid electric vehicles[J]. Railway Technical Research Institute Report, 2006, 20(7):5-10.
- [3] Iannuzzi D, Tricoli P. Metro train equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving [C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Pisa, 2010: 750-756.
- [4] Steiner M, Klohr M. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles[C]//Power Electronics and Applications, 2007 European Conference. Aalborg:IEEE, 2007:2-5.
- [5] Rufer A. Energy storage for railway systems energy recovery and vehicle autonomy in Europe [C]//Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. Sapporo: IEEE, 2010:21-24.
- [6] 赵立峰,张发明. 北京地铁5号线再生电能吸收装置[J]. 现代城市轨道交通 2008(1):6-8.
- [7] Teymourfar R, Asaei B, Iman-Eini H. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 56:206-214.
- [8] Barrero R, Tackoen X. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network [J]. ProcIMEchE part F: J Rail Rapid Transit, 2010, 224(3):207-225.
- [9] 赵坤,杨中平,游小杰. 车载超级电容容量配置及控制策略的研究[J]. 电工技术学报 2011 26(增):149-154.

(编辑:郭洁)

## Impact Factors Analysis of Capacity Configuration of Super-capacitor Energy Storage Device

Wang Bin<sup>1</sup> Yang Zhongping<sup>1</sup> Lin Fei<sup>1</sup> Shi Jingjin<sup>2</sup> Zhao Wei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 2. Beijing Metro R&D Center, Beijing 102208)

Abstract: The adoption of super-capacitor energy storage device in urban rail transit system can solve the problem of regenerative braking failure of the train. To simulate the energy flow of power supply network, a simulation platform was established in the global and dynamic perspective. Through the simulation analysis of one domestic metro line, the impact of different departure intervals, up/down line time differences and the super-capacitor control characteristic on the capacity configuration were probed. Finally, according to the impact factors analysis, an appropriate capacity configuration of energy storage device is determined.

Key words: urban rail transit; stationary; super capacitor; regeneration braking; capacity configuration; impact factors