

文章编号: 1001-8360(2016)06-0045-08

基于节能稳压的地面式超级电容储能系统 容量配置优化研究

王 彬¹, 杨中平¹, 林 飞¹, 赵 炜²

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 北京地铁研发中心, 北京 100044)

摘 要: 在城市轨道交通中应用超级电容可以实现城轨交通的进一步节能, 并有效降低列车发生再生失效的概率。本文结合城轨牵引供电网特点提出供电网的节能稳压评估函数, 建立适用于城轨交通的地面式超级电容储能系统仿真平台。以某地铁线路为例, 分析在不同发车间隔下, 超级电容的设置位置及储能量选取对城轨交通节能效率及稳压效果的影响。仿真结果表明, 相比于全线每座牵引变电所均设置超级电容, 隔多站设置大容量超级电容是更合理的容量配置方案, 为超级电容容量配置方案的优化设计提供了参考依据。

关键词: 城轨交通; 节能效率; 再生失效; 超级电容; 容量配置; 优化设计

中图分类号: TM53 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.06.007

Study on Optimization of Capacity Configuration of Stationary Super Capacitor Storage System for Improving Energy Efficiency and Voltage Profile

WANG Bin¹, YANG Zhongping¹, LIN Fei¹, ZHAO Wei²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Metro R&D Center, Beijing 100044, China)

Abstract: The installation of super capacitor in urban rail transit system allows the recovery of the braking energy, which results in further energy savings, better pantograph voltage profile, as well as effective reduction of the occurrence of the regenerative braking failure of the train. In this paper, firstly, the energy efficiency and regeneration failure evaluation function was put forward based on the characteristics of the urban rail traction power supply network. Then, a simulation platform for the energy storage system of the stationary super capacitor applicable to urban rail transit was established. A case study was conducted on a metro line to analyze the impact of the positioning of super capacitor and storage energy selection on the energy saving efficiency and voltage stabilizing effect of the urban rail transit under different departure headways. According to the simulation results, compared to the scheme of installing a super capacitor at every substation, the scheme of setting one lager capacity super capacitor for several substations could be a better capacity configuration scheme, which provides reference for the optimization design of capacity configuration of super capacitor storage system.

Key words: urban rail transit; energy efficiency; regeneration failure; super capacitor; capacity configuration; optimization design

收稿日期: 2014-04-04; 修回日期: 2014-08-16
基金项目: 城市轨道交通北京实验室(I13H1000301)
第一作者: 王 彬(1990—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生。
E-mail: 12121547@bjtu.edu.cn
通信作者: 杨中平(1971—), 男, 重庆人, 教授, 博士。
E-mail: jialm@vip.sina.com

现代城轨列车普遍采用再生制动的方式将能量回馈到接触网, 由于典型的牵引变电所采用的是二极管整流方式, 多余的再生能量不能通过牵引变电所返送至上级中压网络, 当列车再生制动时, 如果临近没有其

他列车来吸收再生制动能量,再生制动列车受电弓处的电压将急剧上升,当电压超过规定上限值时,将导致再生失效的发生。

近年来,随着飞轮、电池、超级电容等储能技术的发展,如何利用储能技术来降低城轨交通运行能耗及解决列车再生制动失效的问题,受到轨道交通界的广泛关注^[1-7]。

超级电容与二次电池相比具有循环寿命长、充放电为物理变化、对环境无污染、功率密度高、SOC 检测容易等优点,因此超级电容是未来轨道交通领域中储能元件的一个重要选择^[8]。根据安装位置的不同,超级电容可分为车载式及地面式两种方式,本文以地面式为研究对象。在城轨交通线路中,如何确定超级电容在全线中的设置位置及其容量以得到最佳的节能及稳压效果,即容量配置问题,是目前地面式超级电容储能应用中的一个重要研究方向^[9-12]。

文献[9,10]基于软件环境下建立城轨交通供电网络模型,并对超级电容进行了容量配置及节能分析。文献[11,12]建立城轨供电网的数学模型,以网压跌落来判断供电网的剩余能量载荷分布情况,作为超级电容容量配置的依据。文献[9-12]的容量配置方案均是以每座牵引变电所均设置超级电容为前提得到的,而在实际应用中,若每站均设置超级电容,其装置成本将非常高。若能够以更少的变电所设置超级电容而实现较高的节能效率及稳压效果,探寻超级电容容量配置方案的优化性,是本文的主要研究目标。

为分析超级电容安装后对城轨交通的影响,本文提出一套针对牵引供电网的节能及稳压效果评估体系,在 Matlab 环境下建立适用于城轨交通的地面超级电容储能系统仿真平台,并结合国内某地铁线路,分析在不同发车间隔下,超级电容的设置位置及储能能量选取对供电网的节能及稳压效果的影响,为超级电容容量配置方案的优化设计提供了参考依据。

1 牵引供电网节能稳压效果评估

1.1 地面超级电容储能系统结构

城轨交通直流供电网络结构如图 1 所示,超级电容储能装置并联在直流接触网的正、负母线之间,一般安装在牵引变电所内,用阻抗 Z 来表示线路阻抗。储能装置 ESS 由双向 DC-DC 变换器与超级电容组构成,通过对开关管 T_1 、 T_2 的控制实现对超级电容组的充/放电,如图 2 所示。

当直流供电网有列车制动时,列车的再生制动能量除部分供给临近列车牵引利用,剩余的再生能量被超级电容组充电吸收;当有列车牵引时,超级电容组放

电把储存的能量释放出来供给列车牵引利用。通过对超级电容的充放电控制,可以避免直流供电网上剩余再生能量的浪费,降低城轨交通运行能耗,并有效防止再生失效的发生。

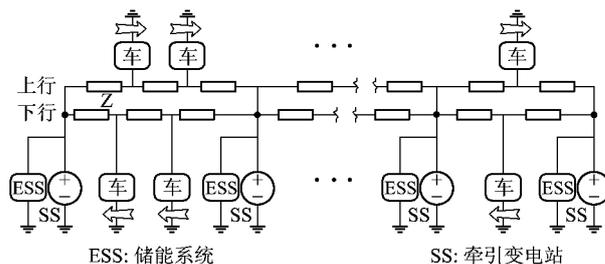


图 1 安装有超级电容的直流牵引供电网络结构图

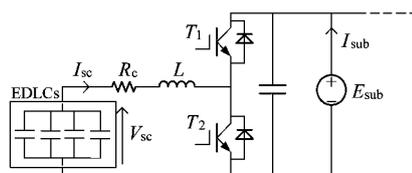


图 2 超级电容储能装置结构图

1.2 节能稳压评估函数

(1) 节能效率

通过计算安装超级电容前后全线牵引变电所输出能耗的差值比作为节能效率的评估函数。

$$e\% = \left[1 - \frac{\sum_1^k \int_0^T U_{sub}^{sc} \cdot I_{sub}^{sc} dt}{\sum_1^k \int_0^T U_{sub}^{nosc} \cdot I_{sub}^{nosc} dt} \right] \cdot 100\% \quad (1)$$

式中： U_{sub} 、 I_{sub} 为牵引变电所端电压及输出电流； T 为单个发车间隔时间； k 为全线牵引变电所数。

(2) 稳压效果

再生制动时再生电流与列车受电弓电压的限制关系曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,当受电弓电压超过 U_{limit} 的时候,发生部分再生失效,此时通过减小再生电流来减少再生制动回馈的能量,减小的那部分再生制动力由空气制动力补足。当受电弓电压超过直流牵引网最大限制值 U_{upper_limit} 后,再生电流为零,再生制动完全切除,全部制动力由机械制动提供。本文以列车发生再生失效时间占全线运行时间之比 $v\%$ (在本文中也称再生失效率) 作为稳压效果的评估函数。

$$v\% = \frac{\sum_1^n T_{(v_{fc} > U_{limit})}}{\sum_1^n T_{line}} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中： T_{line} 为全线运行时间； $T_{(v_{fc} > U_{limit})}$ 为列车发生再生失效的时间； n 为全线上下行总列车数。

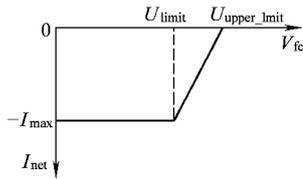


图 3 列车再生电流限制曲线

2 地面超级电容储能系统仿真平台

2.1 直流牵引供电网建模

为分析超级电容不同容量配置方案对直流供电网节能效率及稳压效果的影响,本文在 Matlab 环境下提出了一种适用于城市轨道交通的地面式超级电容储能系统仿真平台。系统框图如图 4 所示,包括列车的牵引计算仿真 TPS、直流网潮流仿真 DC-NLS 以及超级电容储能系统 SCESS。

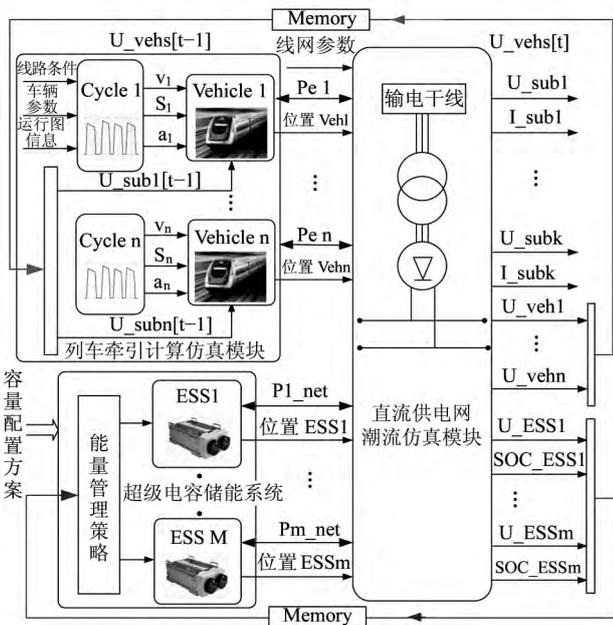


图 4 地面超级电容储能系统仿真平台

2.1.1 列车牵引计算仿真 TPS

从图 4 可以看出,TPS 的输出结果不仅与线路条件、车辆参数及运行图信息有关,它还受仿真时刻列车受电弓处电压的约束。这个模块主要是得到上、下列车的位置以及电功率,为后续直流供电网的潮流计算提供基础数据。图 5 为 TPS 仿真得到的上行线单次列车速度及电功率变化曲线。

2.1.2 直流网潮流仿真 DC-NLS

在对直流供电网络进行电路求解时,由于该网络结构的时变性和非线性,本文提出一种新的直流供电网潮流计算方法,仿真结果证明了该算法满足快速性和收敛性的要求。建模及算法如下:

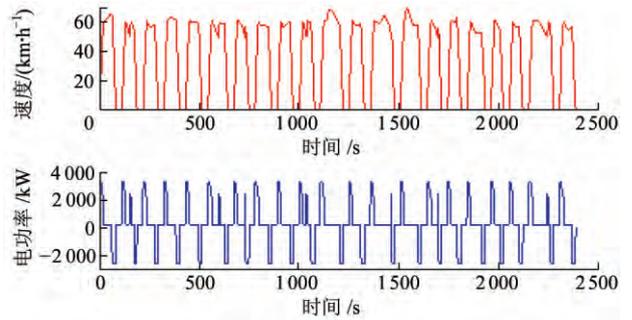


图 5 上行线单列车速度及电功率曲线

(1)对直流供电网进行分割,如图 6 所示,其中 SS 为牵引变电所,Z 为线路阻抗, T_u 、 T_d 分别表示上、下列车。

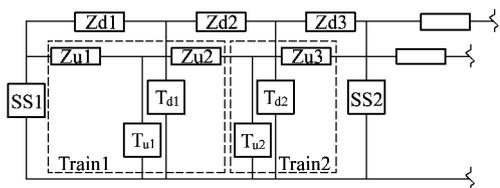


图 6 直流供电网络分割图

(2)对各分割模型进行端口等效及建模(图 7)。

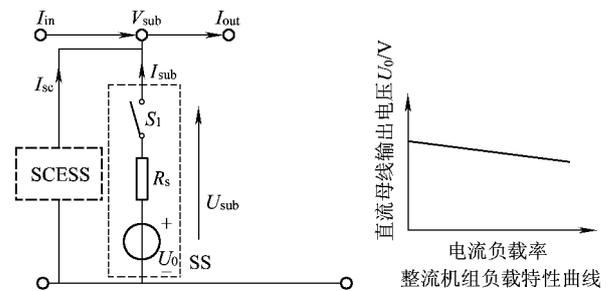


图 7 牵引变电所模型

$$I_{out} = I_{in} + I_{sc} + I_{sub} \quad (3)$$

$$U_{sub} = U_0 - R_s I_{sub} \quad (4)$$

牵引变电所为二极管不控整流,电流流向具有单向性。为模拟其单向性,当变电所输出电流 I_{sub} 为正向时,开关 S_1 闭合;当 I_{sub} 为负向时,开关 S_1 断开,其中 U_0 表示空载时直流母线输出电压。

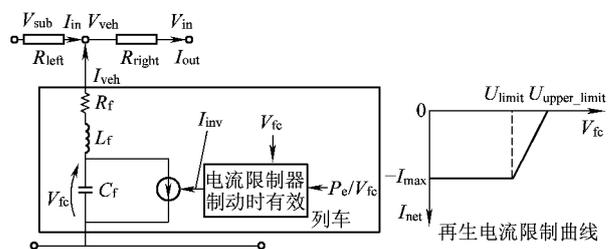


图 8 列车模型

$$\frac{dI_{veh}}{dt} = \frac{1}{L_f}(V_{veh} - V_{fc} - R_f I_{veh}) \quad (5)$$

$$\frac{dV_{fc}}{dt} = \frac{1}{C_f}(-I_{veh} - I_{inv}) \quad (6)$$

$$V_{sub} - V_{veh} = R_{left} I_{in} \quad (7)$$

$$V_{veh} - V_{in} = R_{right}(I_{in} + I_{veh}) \quad (8)$$

式中： C_f 为等效列车支撑电容； L_f 为等效滤波电抗器； I_{inv} 为逆变器箱输出电流。

2.2 超级电容储能系统建模

超级电容储能系统模型如图 9 所示，通过检测变电所端电压 U_{sub} 及超级电容 SOC 实现对超级电容的充放电控制。能量管理策略如图 10 所示。能量管理策略分为三个部分：直流电网网压约束、超级电容充放电控制、超级电容 SOC 约束。

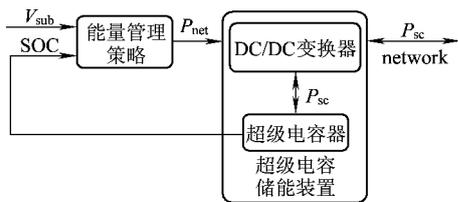


图 9 超级电容储能系统模型

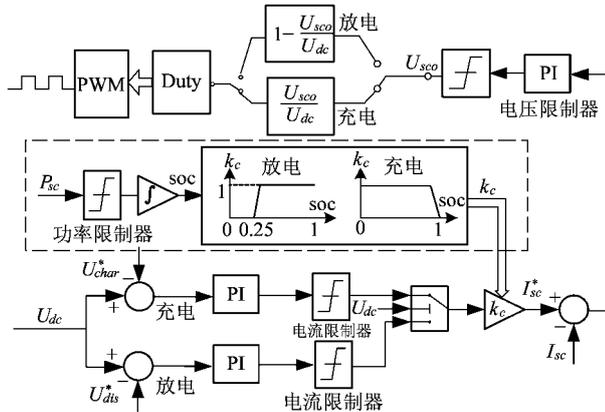


图 10 地面式超级电容能量管理框图

超级电容 SOC 定义为

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{scmax}} = \frac{\frac{1}{2}CU_{sc}^2}{\frac{1}{2}CU_{scmax}^2} = \left(\frac{U_{sc}}{U_{scmax}}\right)^2 \quad (9)$$

由式(9)可知，超级电容的能量与端电压成平方关系。在超级电容充放电过程中，端电压变化较大。放电时，若超级电容端电压太低，Boost 升压功能将很难实现，故通常将超级电容端口电压设定在 $(0.5 \sim 1)U_{scmax}$ 之间，此时 SOC 工作范围为 $0.25 \sim 1$ 。

若仿真中全线每座牵引变电站均设置超级电容，超级电容储能能量设为 $10 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，功率等级为 2 MW ，最高端电压为 625 V 。图 11 所示为发车间隔 600 s 时

仿真得到的牵引变电所电压、超级电容端电压、充放电功率及 SOC 曲线。当检测到变电所电压超过 U_{char} ，超级电容进入充电状态，端电压升高，SOC 值增大；当检测到变电所电压低于 U_{dis} ，超级电容进入放电状态，端电压下降，SOC 值减小。由仿真结果可知，加入超级电容后，牵引变电所电压能够稳定在 $700 \sim 900 \text{ V}$ 之间，超级电容 SOC 维持在 $0.25 \sim 1$ 之间。

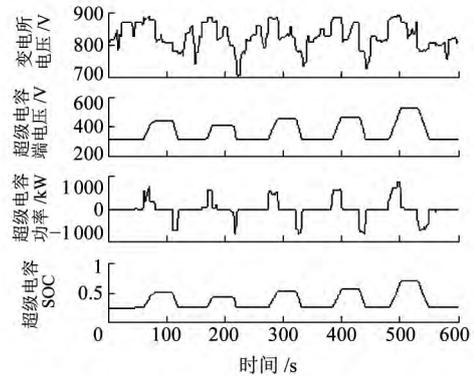


图 11 能量管理策略仿真结果

3 地铁线路实例仿真

3.1 仿真输入条件

(1) 牵引供电输入

本文以国内某地铁线路为例进行实例仿真，全线共有 22 个车站，13 座牵引变电所，其牵引变电所位置、供电网参数见表 1、表 2。

表 1 牵引变电所位置

牵引变电所	站间距/km	牵引变电所	站间距/km
站 1		站 7	
站 2	1.11	站 8	2.762
站 3	1.926	站 9	1.534
站 4	2.16	站 10	1.767
站 5	2.303	站 11	1.884
站 6	2.12	站 12	2.594
站 7	2.695	站 13	1.007

表 2 供电网参数

参数	数值
变电所空载电压 U_0/V	836
充放电阈值 U_{char}/U_{dis}	850 V/800 V
$U_{limit}/U_{upper_limit}$	900 V/970 V
变电所等效内阻/ Ω	0.07
单位接触网阻抗/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.007
单位钢轨阻抗/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.009
受电弓阻抗/ Ω	0.015
发车间隔/s	600/300/150

(2)容量配置输入

选用 Maxwell 公司 BMOD0063P125 模组作为容量配置单元,模组储能量 136.7 W·h,峰值电流 1 800 A,最大串联电压 1 500 V。

超级电容组端电压最大值取 625 V,串联数取 5,并联数分别取 3~12,共 10 组容量方案,见表 3。改变超级电容的设置位置,全线均设置、每隔一站、每隔二站、每隔三站等共六组设置方案。

表 3 牵引变电所设置容量方案

容量方案	模组串联数	模组并联数	ESS 端电压 /V	ESS 储能量 /($\text{kW}\cdot\text{h}$)
I	5	2	625	1.367
II	5	4	625	2.734
III	5	6	625	4.101
IV	5	8	625	5.468
V	5	10	625	6.835
VI	5	12	625	8.202
VII	5	14	625	9.569
VIII	5	16	625	10.936
IX	5	18	625	12.303
X	5	20	625	13.67

可知,随着发车间隔减小,列车再生能量利用率(再生能量/牵引能量)由 41.3%增至 59.1%,呈缓慢增大趋势;再生失效率由 46.4%减小至 2.7%,呈迅速减小的趋势。

表 4 不设置超级电容时能量流动关系

发车间隔/s	600	300	150
变电所输出能耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	683.5	521.1	448.9
列车牵引能耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	894.0	826.8	781.9
列车制动能量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	513.0	513.0	500.8
列车再生能量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	369.3	435.7	461.8
线路损耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	71.7	56.0	50.4
再生能量利用率/%	41.3	52.7	59.1
再生失效率/%	46.4	17.6	2.7

随着发车间隔减小,邻近列车间牵引/制动能量交互愈加频繁,使得堆积在直流供电网上的剩余再生制动能量减少。堆积的再生制动能量的减少抑制了受电弓电压抬升,表现为再生失效率降低。由再生电流限制曲线,电压抬升减小又会进一步促进再生能量的产生,从而使得列车再生能量增加,表现为再生能量利用率增大。

3.2 全线不设置超级电容

表 4 所示为全线不设置超级电容时,在不同发车密度下单个发车间隔时间内的能量流动情况。由表 4

3.3 全线设置超级电容

(1)发车间隔 600 s

图 12 所示为 600 s 发车间隔时不同容量配置方案下节能效率/稳压效果比较图。

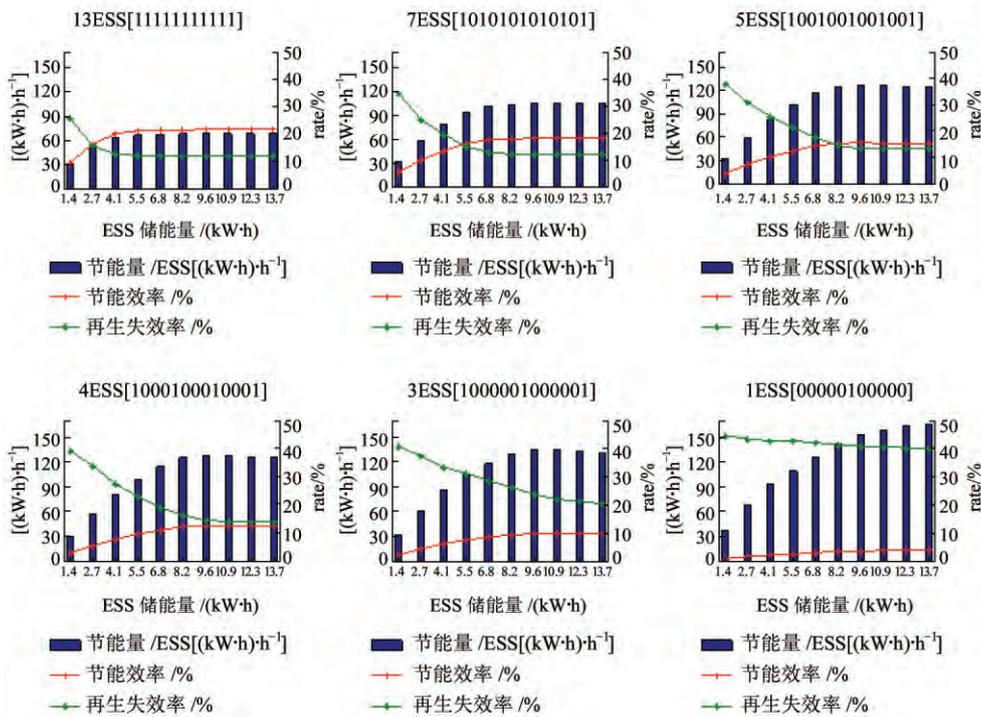


图 12 600 s 发车间隔下不同容量配置方案的仿真结果

为评估单位储能装置的节能效果,引入单位储能装置单位小时节能量。当全线每座牵引变电所均设置超级电容,储能量为 1.4 kW·h 时,节能量/h/ESS 最小,为 30 kW·h/h;当全线仅一座变电所设置超级电容,储能量为 8.2 kW·h 时,节能量/h/ESS 取得最大值为 165 kW·h/h。随着储能量值逐渐增大,直流供电网上能被超级电容吸收的剩余再生能量增加,节能量/h/ESS 呈上升趋势,当直流供电网上的剩余再生能量完全被吸收后,节能量趋于平缓。

比较不同超级电容设置位置下的节能效率曲线,当全线均设置超级电容时,节能效率取得最大值约为 21.6%。随着全线设置储能装置数减少,直流电网上剩余再生能量不能被超级电容完全吸收,节能效率不断下降,当全线仅一座变电所设置储能装置时,节能效率最大仅为 4.0%。在同一超级电容设置方案下,随着储能量值增加,节能效率均呈现先上升后趋于平缓的趋势。

观察再生失效率曲线,当全线均设置超级电容时,再生失效率取得最小值 11.9%。随着全线设置储能装置数减少,再生失效率不断上升,当全线仅设置一个储能装置时,再生失效率最大值为 40.1%,接近于全线均不设置超级电容时的再生失效情况。在每种超级电容设置方案下,随着储能量值增加,再生失效率均呈现先下降后趋于平缓的趋势。

(2)发车间隔 300 s

图 13 所示为 300 s 发车间隔时不同容量配置方

案下节能效率/稳压效果比较图。

相比于发车间隔 600 s 时,发车间隔 300 s 时的节能量/h/ESS 平均下降约 50 kW·h/h。这是由于发车间隔减小,列车再生能量能更多地被临近列车牵引利用,相应地被超级电容吸收的剩余再生能量减小,单位储能装置节能效果变差。在同一超级电容设置方案下,节能量的变化趋势与 600 s 发车间隔时相似。

观察节能效率曲线,与 600 s 发车间隔时相比,节能效率约减小为原来的 40%左右。当全线均设置超级电容时,节能效率最大为 9.8%左右,当全线仅一座变电所设置超级电容时,最大节能效率仅 1.6%。

对比再生失效率曲线,发车间隔 300 s 时再生失效情况有较大改善,当全线均设置储能装置时,取得最小值 7.8%。发车间隔变小,列车间能量交互愈加频繁,使得列车再生能量能够更多地被临近列车吸收,堆积在供电网上的剩余再生能量减小,抑制了网压的抬升,再生失效情况有较大改善。

(3)发车间隔 150 s

图 14 所示为 150 s 发车间隔时不同容量配置方案下节能效率/稳压效果比较图。

发车间隔进一步缩短,列车再生能量几乎完全被邻近列车牵引利用,直流供电网上能被超级电容吸收的剩余再生能量几近于无,故相比于其他发车间隔,节能量/h/ESS 与节能效率均有大幅度减小。由于直流供电网上几乎无剩余再生能量的堆积,网压大部分时间均能够稳定在 900 V 以下,再生失效情况大幅度改善。

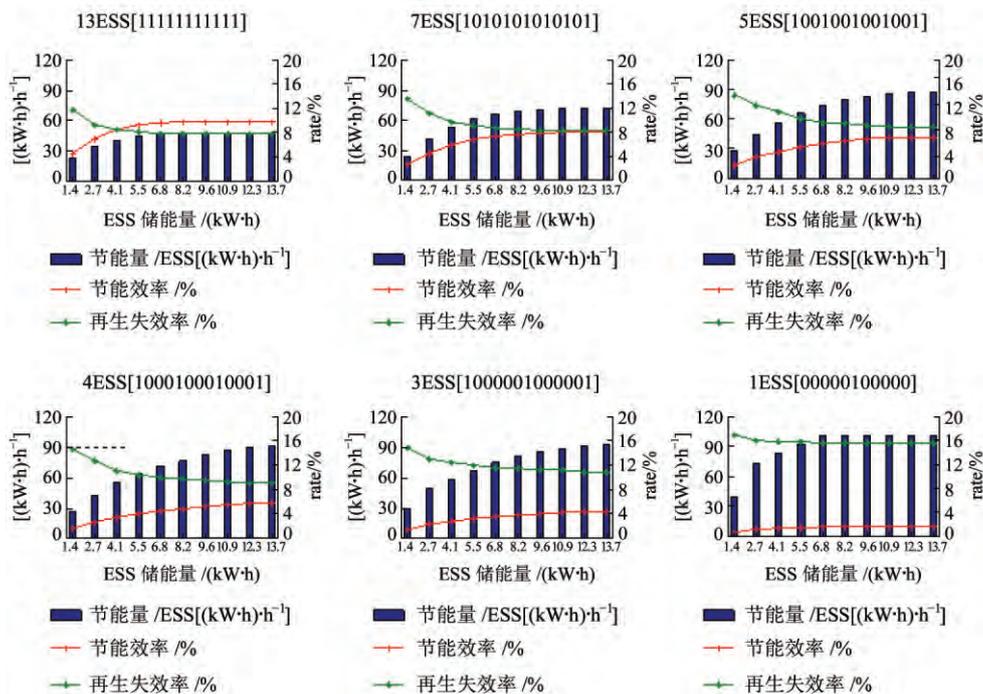


图 13 300 s 发车间隔下不同容量配置方案的仿真结果

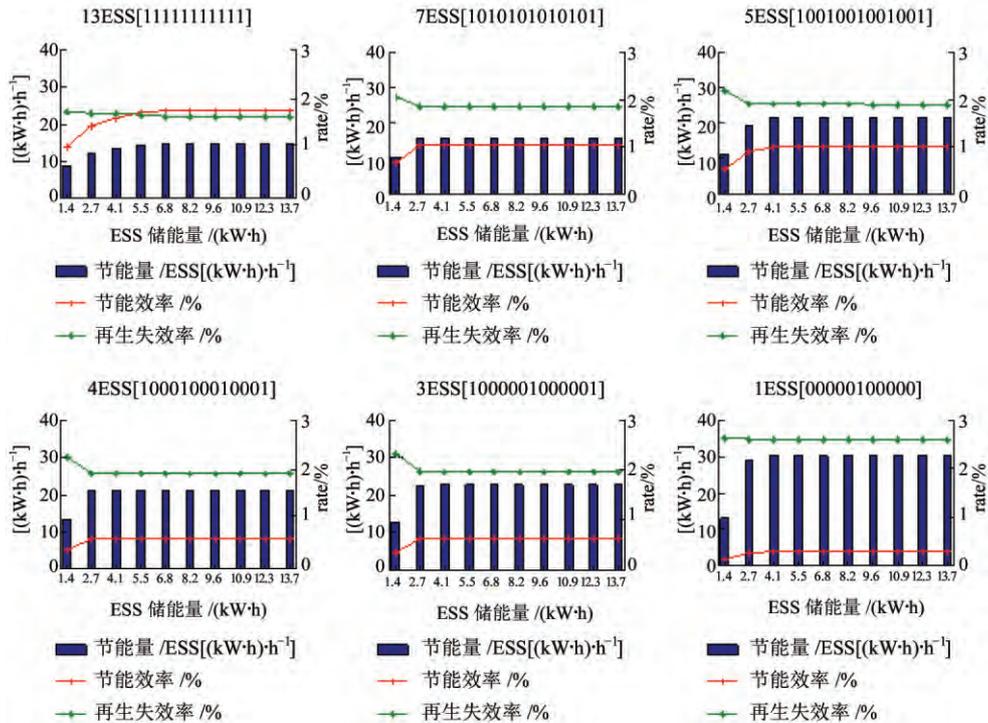


图 14 150 s 发车间隔下不同容量配置方案的仿真结果

3.4 容量配置方案选取

从节能效率与再生失效率角度出发,综合各发车间隔,为取得最佳的节能及稳压效果,若全线每座牵引变电所均设置超级电容,储能量应不少于 5.5 kW·h;若每隔一站设置超级电容,储能量应不少于 6.8 kW·h;若每隔两站设置超级电容,储能量应不少于 8.2 kW·h;若每隔三站及以上设置超级电容时,储能量应不少于 9.6 kW·h,但此时节能稳压效果较差,不建议采用。

从节能量/h/ESS 角度出发,当发车间隔 600 s 时,若全线每座牵引变电所均设置超级电容,其最大节能量为 68 kW·h/h,为超级电容能够实现的上限节能量(165 kW·h/h)的一半不到,超级电容储能利用率仅为 40%,若从储能装置经济性角度来考虑,不建议采用。当每隔一站或隔两站设置超级电容时,节能量能达到 100 kW·h/h 以上,储能利用率最高达 75%。当发车间隔 300 s 时,分析结果与 600 s 相似。

综上所述,每间隔一站设置 6.8 kW·h 或者每间隔两站设置 8.2 kW·h 超级电容是更为合理的容量配置方案。

4 结论

在城市轨道交通中应用超级电容可以实现城轨交通的进一步节能,并有效降低列车发生再生失效的概率。由仿真结果可知,发车间隔是影响超级电容容量配置的重要因素。在较小发车间隔下,列车间的能量交互

是影响直流供电网上再生能量流动的主导因素,随着发车间隔增加,列车间能量交互频率降低,使得堆积在直流供电网上的剩余再生能量增加,因此需要更大储能量以及更密集设置的超级电容来吸收剩余再生能量。

结合地铁实际线路参数,通过仿真分析了超级电容设置位置及储能量选取对直流供电网节能效率及稳压效果的影响,为指导超级电容容量配置的优化设计提供了理论依据。根据仿真结果,每间隔一站设置 6.8 kW·h 或者每间隔两站设置 8.2 kW·h 超级电容是更为合理的容量配置方案。

在对地面超级电容进行容量配置时,除了考虑技术层面因素外,还有必要考虑储能装置经济因素。在兼顾节能稳压性与经济性的前提下,如何得到最佳的容量配置方案是下一步需要深入研究的内容。

参考文献:

[1] BARRERO R, TACKOEN X, VAN MIERLO J. Energy Savings in Public Transport[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 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[J]. International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion. New York: IEEE

- Press, 2010; 750-756.
- [4] Ricardo Barrero, Xavier Tackoen, Joeri Van Mierlo. Improving Energy Efficiency in Public Transport: Stationary Supercapacitor Based Energy Storage Systems for a Metro Network[C]//2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, New York: IEEE Press, 2008; 1-8.
- [5] González-Gil A, PALACIN R, BATTY R. Sustainable Urban Rail Systems: Strategies and Technologies for Optimal Management of Regenerative Braking Energy[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75(5): 374-388.
- [6] Dr. Michael Steiner, Markus Klohr. Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications, New York: IEEE Press, 2007; 1-10.
- [7] RUFER A. Energy Storage for Railway Systems, Energy Recovery and Vehicle Autonomy in Europe[C]//Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International. New York: IEEE Press, 2010; 3 124-3 127.
- [8] CICCARELLI F, IANNUZZI D, TRICOLI P. Control of Metro-trains Equipped with Onboard Supercapacitors for Energy Saving and Reduction of Power Peak Demand[J]. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 2012, 24(24): 36-49.
- [9] TEYMOURFAR R, ASAEI B, Iman-Eini H. Stationary Supercapacitor Energy Storage System to Save Regenerative Braking Energy in a Metro Line[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 56(2): 206-214.
- [10] BARRERO R A, MIERLO J A V. Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2010; 224(3): 20-25.
- [11] IANNUZZI D, CICCARELLI F, LAURIA D. Stationary Ultracapacitors Storage Device for Improving Energy Saving and Voltage Profile of Light Transportation Networks [J]. Transportation Research Part C, 2012, 21 (1): 321-337.
- [12] IANNUZZI D, PAGANO E, TRICOLI P. The Use of Energy Storage Systems for Supporting the Voltage Needs of Urban and Suburban Railway Contact Lines[J]. Energies, 2013, 6(4): 1 802-1 820.

(责任编辑 聂清立)

《铁道学报》对撰写中英文摘要的要求

为读者提供检索服务的国内外各类检索数据库,属于二次文献数据库,其入编论文的条目内容有题名、作者、文摘、参考文献等等,无全文信息,所以文摘的质量非常重要。一方面这些检索数据库要依据文摘的质量来决定该文章是否被收录;另一方面读者要根据文摘提供的信息考虑是否阅读、引用原文。文章如能被利用,才能体现文章的发表价值,提高原文的被引用频次、扩大原文的传播范围。因此希望作者按照规范认真撰写中英文摘要,使读者在没有看到全文的情况下,能够很清楚地了解该论文的中心内容。

摘要是以提供论文内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、准确地记述论文主要内容的短文。摘要的撰写必须符合“拥有与论文同等量的主要信息”的原则,即信息量一定要完整。重点应包括以下要素,即研究目的、过程及方法、结果和结论。其中:

(1) 研究目的:说明该文的研究目的、内容,要解决的问题;

(2) 过程及方法:说明主要工作过程及采用的方法、原理,也包括仪器设备、边界条件及必要的参数;

(3) 结果和结论:说明得出的研究结果和主要结论及结论的应用范围。如有可能,结论的内容应具体到数字。

在执行上述原则时,在有些情况下,摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其他重要信息。

摘要不应含有引言中出现的内容,也不要对论文内容作诠释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用

的符号和术语;不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文;缩略语、略称、代号,除了相邻专业的读者也能清楚理解的以外,在首次出现时必须加以说明;科技论文写作时应注意的其它事项,如采用法定计量单位、准确使用专业术语和标点符号等,也同样适用于摘要的撰写。

中文摘要宜控制在 250~300 字。英文摘要要能完整准确地表达中文摘要的内容,信息量不能少于中文摘要。英文摘要的长度一般不超过 250 words,不少于 130 words。

美国工程索引 Ei 为二次文献,属检索数据库,对摘要的写法有具体要求。现根据 Ei 的有关要求,提出翻译撰写英文摘要的注意事项如下,请作者参照。

1. 缩短文摘方法

(1) 语言简洁。不加评论语句,如“相当满意”、“令人可喜”等。不使用多余的词语,如“据报道……”、“大量的调查表明……”、“本文所谈的有关研究工作是对过去老工艺的一个极大的改进”、“本工作首次实现了……”、“经检索尚未发现与本文类似的文献”等。应尽量删去的非必要字句有:“It is reported”, “Extensive investigation show that”, “The author discusses”, “This paper concerned with”, “based on the analyses conducted”, “on the above basis”, “in detail”, “briefly”, “mainly”, “here”, “in addition”, 文摘开头的“in this paper”, 等等。

(下转第 67 页)