

车载超级电容储能系统间接电流控制策略

赵 坤 王湛榕 王德伟 杨中平 游小杰
(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 主要探讨了单列车车载超级电容能量管理系统的控制方法。首先对车载超级电容储能系统进行介绍;然后建立超级电容储能系统的数学模型,给出了超级电容储能系统充放电电流控制环的设计方法,提出了一种车载超级电容储能系统间接电流能量管理控制策略;最后通过仿真和实验结果证明该控制策略可以有效地抑制受电弓处电压波动,防止再生失效。

关键词: 超级电容 双向 DC-DC 变换器 能量管理 直流铁道 再生失效

中图分类号: TM464

Indirect Current Control Strategy of On-Board Supercapacitor Energy Storage System of Railway Vehicle

Zhao Kun Wang Shenrong Wang Dewei Yang Zhongping You Xiaojie
(Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China)

Abstract This paper discusses the control strategy of energy management in single railway vehicle with a on-board supercapacitor energy storage system. First, the structure of the energy storage system is introduced. Second, the model of energy storage system is built and a method to design the current loop for bi-directional DC-DC converter for energy storage is proposed. Finally, an indirect current control strategy is established to ensure an optimal power flow of single railway vehicle. The simulation and the experimental results verify that the new control strategy can avoid the voltage fluctuation and regeneration failure.

Keywords: Supercapacitor, bi-directional DC-DC converter, energy management, DC railway, regeneration failure

1 引言

与道路、航空等交通方式相比,轨道交通运输具有运量大、定时、安全、环保、节能等显著优点。在全球倡导保护环境、防止地球暖化的今天,轨道交通环保、节能的优点已越来越受到人们的重视,大力发展轨道交通已成为世界各国的共识。轨道交通车辆采用交流传动技术后,再生制动成为列车常用的制动方式,由于再生制动能量可供相同供电区间内的其他处于牵引状态的列车利用,进一步降低了列车的运行能耗,使轨道交通在节能运行方面的优势越发突出。然而,使用再生制动的前提是线路上必须有足够的负载来吸收再生能量,否则就

容易造成受电弓电压升高超过允许值,引发主电路断开,导致再生制动失效。近年,随着二次电池、飞轮、超级电容(EDLC)等储能技术的发展,如何利用储能技术来解决列车制动失效、改善列车高速制动力不足得到世界轨道交通界的广泛关注^[1-5]。

本文研究了城轨列车的制动能量特点以及超级电容本身特性,分析了二者之间的特性匹配关系,建立了储能系统的数学模型,提出一种基于车载超级电容系统间接电流控制方法,通过该控制方法可以有效地抑制线网电压波动,防止再生制动失效,节省列车运行能耗。

2 超级电容特性及城轨列车特性分析

城轨列车特性如图1所示,从图1中可知列车制动工况与牵引工况有显著的不同,牵引时恒功区

功率一定，且恒功区范围宽，要求储能元件为能量型，制动时再生功率为尖峰状，要求储能元件为功率型。除此之外城轨列车启动、制动频繁，则要求储能元件充放电快且循环寿命长。储能元件超级电容具有功率密度高、充放电速度快、循环寿命长等优点。由二者特性匹配分析可知超级电容是非常适合应用于城轨交通的。

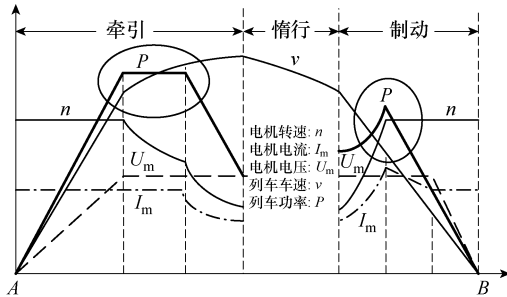


图 1 城轨列车牵引/制动特性

Fig.1 Traction/breaking characteristic of railway vehicle

3 车载超级电容储能系统的结构

车载超级电容储能系统的装置结构如图 2 所示，主要由两部分组成：一是能量变换装置双向 DC-DC 变换器；二是超级电容器组。为了使能量合理分配，两者采用并联的连接关系，双向 DC-DC 变换器的控制与牵引逆变器的控制是相互独立的，在不改变原有列车控制策略的基础上，超级电容储能装置就能装在既有的城轨列车上使用。

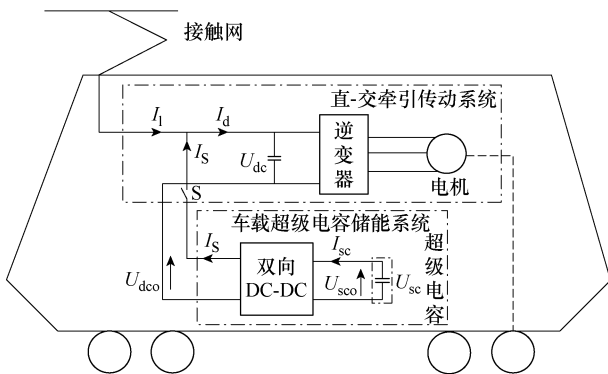


图 2 车载超级电容储能系统结构图

Fig.2 The structure of on-board supercapacitor energy storage system of railway vehicle

图 1 中 I_1 为线网电流； I_d 为列车牵引或再生制动需要的电流； I_s 为储能系统的输出电流， U_{dc} 为逆变器前端电压； U_{dco} 为储能系统的前端电压，且满足 $U_{dco}=U_{dc}$ ； U_{sc} 为超级电容端电压；器件 S 为隔离开关，当超级电容备用时，S 断开。

3.1 数学模型

超级电容储能系统主要由双向 DC-DC 变换器和超级电容器组构成，结合两者特性利用状态空间平均法对双向 DC-DC 变换器的降压斩波器和升压斩波器分别建模，最终得到统一的控制模型^[8]。

电路的参考方向如图 3 所示，其中 i_L 为与超级电容串联的电感电流，与 I_{sc} 相同； U_C 为超级电容电压， U_r 为超级电容内阻上的电压； U_{sc} 为超级电容端电压； U_{dc} 为直流侧端电压； L 为储能电感， C_{sc} 为超级电容容量。

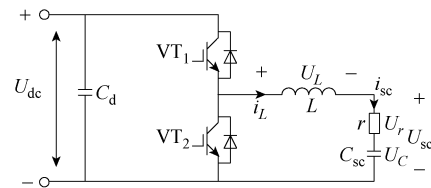


图 3 双向 DC-DC 变换器的拓扑结构

Fig.3 Bi-directional DC-DC converter topology

经过推导得到

(1) 电压开环传递函数

$$G_{id}(s) = \frac{C_{sc}s}{LC_{sc}s^2 + rC_{sc}s + 1} = \frac{I_{sc}(s)}{U_d(s)} \quad (1)$$

(2) 电流开环传递函数

$$G_{ud}(s) = \frac{rC_{sc}s + 1}{LC_{sc}s^2 + rC_{sc}s + 1} = \frac{U_{sc}(s)}{U_d(s)} \quad (2)$$

通过分析电压开环传递函数可知超级电容电压是稳定的，且系统的对数幅频特性曲线与典型惯性环节的幅频响应相似，超级电容电压的阶跃响应跟踪良好，为一阶惯性环节响应特性。电流环虽然开环稳定，快速性和准确性均不能满足要求。另外，考虑到在超级电容储能系统中，储能装置与列车的能量关系是由控制超级电容的电流来反映的，所以要对超级电容电流进行闭环反馈控制。

3.2 电流闭环校正分析

电流闭环校正结构框图如图 4 所示。

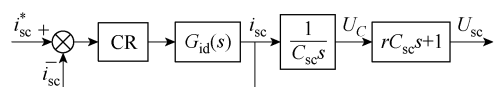


图 4 电流闭环校正结构框图

Fig.4 Current loop correction structure diagram

图 4 中 CR 为电流 PI 调节器，其传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

电流 PI 调节器校正后的电流开环传递函数为

$$G_{ido}(s) = \frac{C_{sc}K_p s + K_i}{LC_{sc}s^2 + rC_{sc}s + 1} = \frac{C_{sc}K_p}{s + \frac{rC_{sc} - \sqrt{r^2C_{sc}^2 - 4LC_{sc}}}{2LC_{sc}}} \quad (4)$$

且 K_p 和 K_i 应满足

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{rC_{sc} + \sqrt{r^2C_{sc}^2 - 4LC_{sc}}}{2L} \quad (5)$$

由此可见，该电流的响应时间仅和系统的固有参数相关， K_p 的值与超级电容的内阻主要决定着系统的响应速度和超调量，因此可令 $K_p=r$ ，根据式(5)得到 K_i 的值，则可将电流开环传递函数校正为一个一阶惯性环节，可使超级电容电流获得良好的稳定性、快速性。

4 车载超级电容储能系统间接电流控制策略

传统的地面超级电容储能系统控制^[6-7]特性如图 5 所示，从图 5 可知超级电容储能系统的电流给定是随网压的变化而化的，网压高的时候吸收电流，网压低时馈出电流，由于地面储能装置不受其重量以及体积的限制，故其可以容量做的很大，以稳定整条供电线上的电压。

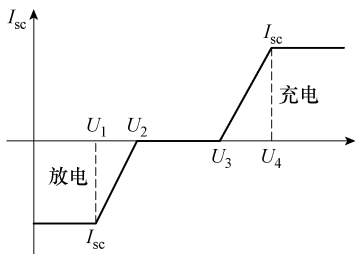


图 5 地面超级电容储能系统控制特性

Fig.5 Control characteristic of supercapacitor energy storage system on ground

由于车载超级电容受其本身特性（能量密度低），以及车上空间的限制，故其能量管理应该更多的考虑本车，即本车牵引时馈出电流，抑制受电弓处电压跌落，改善其加速性能；本车制动时吸收再生电流，抑制受电弓处电压泵升，防止再生失效，改善其电制动性能。基于以上两点分析，本文提出一种车载超级电容储能系统间接电流控制策略，如图 6 所示。

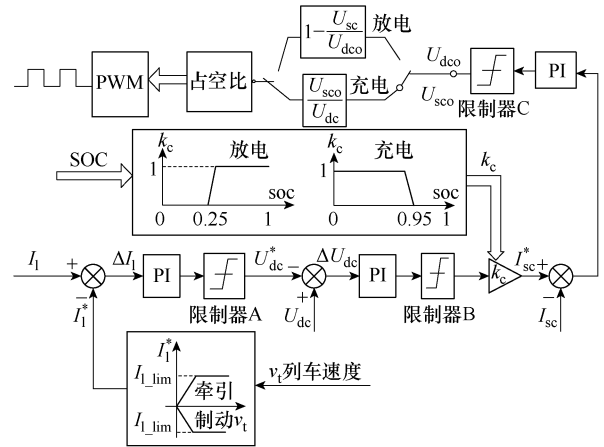


图 6 间接电流控制框图

Fig.6 Indirect current control diagram

从图 6 中可以看出与传统地面超级电容储能系统控制^[5-6]不同的是： U_{dc} 的给定方式是通过控制线网电流而间接给定，线网电流与给定线网电流之间的比较值决定了 U_{dc}^* 的阈值。在满足相应逻辑条件的基础上就能保证超级电容储能系统按设计的能量管理策略正确动作。

下面对控制框图中的部分内容做详细说明。框图中线网电流的给定值 I_1^* ，如图 7 所示。

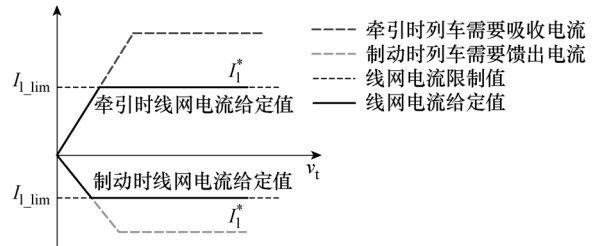


图 7 线网电流 I_1^* 给定示意图

Fig.7 Command of line current I_1^*

I_1^* 是线网给定电流，是随列车速度的变化而变化，且在牵引和制动时候对应不同的电流限制值。根据基尔霍夫电流定律可知

$$I_s^* = I_d - I_1^* \quad (6)$$

式中， I_d 是列车牵引或制动时所需电流； I_1^* 是线网给定电流； I_s 是储能系统输出电流。

框图中有 3 个限制器，它们的功能如下：

(1) 限制器 A：主要决定着超级电容储能系统动作电压的阈值，以 1500V 系统为例，由于线网电压波动范围较广，为确保指令的可靠性，因此在牵引和制动时候 U_{dc}^* 的指令值必须带有滞环功能，不同的滞环指令值在列车牵引或制动时对储能装置的充放电电流有密切关系。

(2) 限制器 B：决定超级电容的充放电电流的

上限值，当充放电电流大于上限值时，那么超级电容就以上限值进行充放电，达到保护超级电容的目的。

(3) 限制器 C：决定超级电容的电压上限值，也就是 SOC 的限制值，当超级电容的 SOC 在放电时接近 0.25 时，通过控制 k_c 减小放电电流，直至 0；当超级电容 SOC 在充电时接近 0.95 时，同样控制 k_c 减小充电电流，达到保护超级电容的目的。控制算法流程图如图 8 所示。

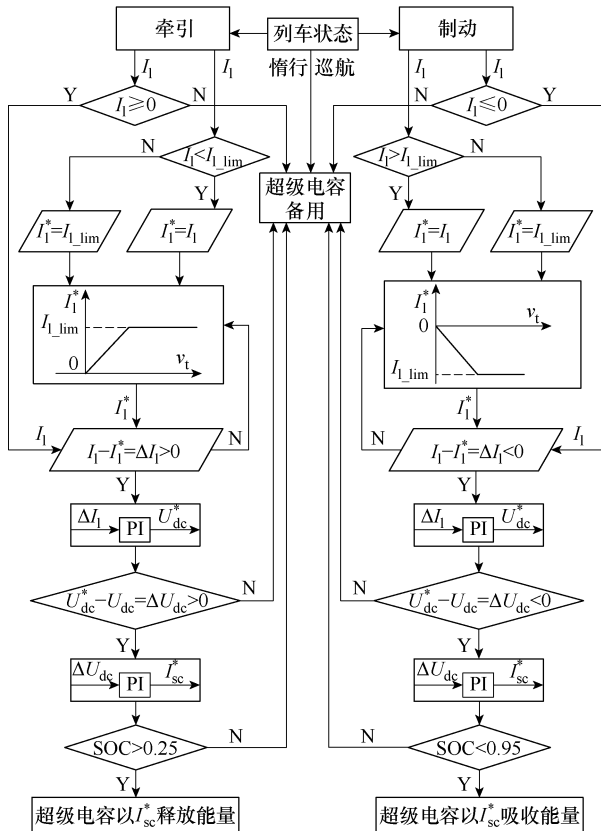


图 8 车载超级电容储能系统间接电流控制算法流程图

Fig.8 Indirect current control algorithm diagram of on-board supercapacitor storage system

要保证超级电容储能系统正确动作，必须满足以下 2 个逻辑条件：

(1) 线网电流逻辑关系如下：

$I_1 > 0$ ，此时表明列车处于牵引工况，需要超级电容放电，提供牵引功率。

$I_1 < 0$ ，此时表明列车处于制动工况，需要超级电容充电，吸收再生功率。

通过对线网电流的流向以及大小的控制，间接地控制了超级电容储能系统能量流动的方向和大小。

(2) 线网电压逻辑关系如下：

列车牵引时： $U_{dc}^* > U_{dc}$ ，且 $\Delta U_{dc} = U_{dc}^* - U_{dc} > 0$ ，控制超级电容放电；否则，超级电容不工作，处于备用状态。

列车制动时： $U_{dc}^* < U_{dc}$ ，且 $\Delta U_{dc} = U_{dc}^* - U_{dc} < 0$ ，控制超级电容充电；否则，超级电容也是处于备用状态。

通过对网压 U_{dc}^* 动作阈值的设定可以有效地抑制网压的波动，将网压控制在一定范围内，防止再生失效的发生。

5 仿真分析

5.1 仿真参数

为了验证超级电容间接电流控制算法的有效性，利用 Matlab/Simulink 搭建了单变电所单列车仿真平台，进行了仿真实验。仿真平台由变电所、线路、列车以及超级电容储能系统四部分组成。表 1 给出了列车参数，表 2 给出了车载超级电容器组参数。

表 1 列车参数

Tab.1 Parameters of vehicle	
参 数	数 值
额定功率/kW	3000
齿轮传动效率(%)	93
电机效率(%)	90
逆变器效率(%)	91
轮径/m	0.84
变电所等效内阻/mΩ	13
变电所空载电压/V	1500

表 2 全车车载超级电容器组参数

Tab.2 Parameters of on-board supercapacitor	
单体参数	$C=3000F, V_{max}=2.7V$
储能密度/(Wh/kg)	6.0
串并联组合	4 并 × 400 串, 30F
可用能量/kWh	4.8
最大电压/V	1000

5.2 仿真结果

列车速度特性曲线图 9 所示。由图 10 电流关系可知：牵引时，当列车需要的电流超过限制值，超级电容储能系统释放能量，减小了线网提供的电流，抑制了受电弓处网压的跌落。列车巡航时，超级电容储能系统处于备用状态。制动时，当制动电流超过限

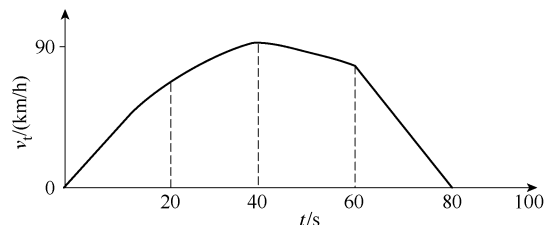


图 9 列车速度特性曲线

Fig.9 The speed characteristic curve of railway vehicle

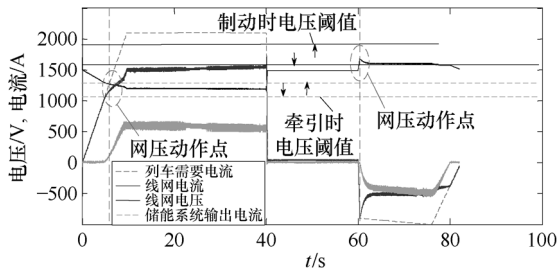


图10 电压、电流曲线

Fig.10 Current relation and voltage variation

制后, 超级电容吸收再生制动电流, 抑制了受电弓处电压的上升, 防止了再生失效。

6 实验平台及结果分析

6.1 车载超级电容实验平台框图

基于仿真平台, 在实验室搭建了一个 3kW 的超级电容实验平台, 实验平台系统框图如图 11 所示。实验平台主要包括三大部分: 变电所模拟系统, 列车模拟系统以及超级电容储能系统。

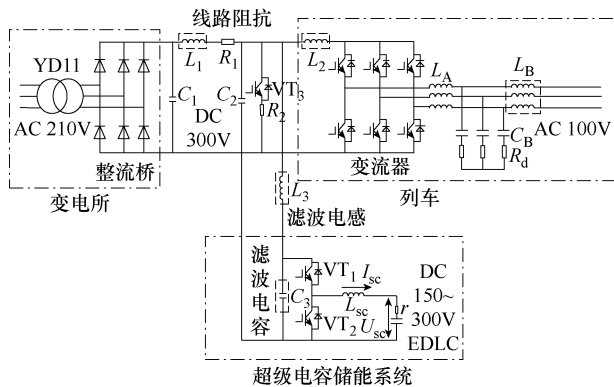


图11 3kW 超级电容实验平台系统框图

Fig.11 Block diagram of 3kW supercapacitor platform

变电所模拟系统由 380V 交流电网经自耦调压器输出 AC210V, 再经三相隔离变压器(保证列车模拟系统和变电所系统同时并网), AC210V 经过二极管不控整流得到 300V 直流网。

列车模拟系统由 PWM 整流器实现, PWM 整流器采用 LCL 滤波回馈到电网。根据列车的特性, 计算出 I_d 的指令值。当 $I_d > 0$ 时, PWM 变流器工作在整流状态, 列车工作在制动回馈工况; 当 $I_d < 0$ 时, PWM 变流器工作在逆变状态, 而列车工作在牵引工况或惰行工况。模拟的列车的牵引特性曲线如图 12 所示。

储能系统由超级电容器和双向 DC-DC 电路组成, 可以实现 Buck 充电和 Boost 放电。超级电容器选用北京集星公司的产品, 额定电压 320V, 电容容值 1.5F, 内阻 2.75Ω。实验平台如图 13 所示。

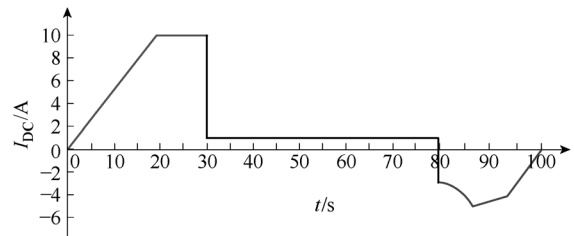


图12 列车模拟系统的牵引制动特性曲线

Fig.12 Characteristic curve of the vehicle simulation

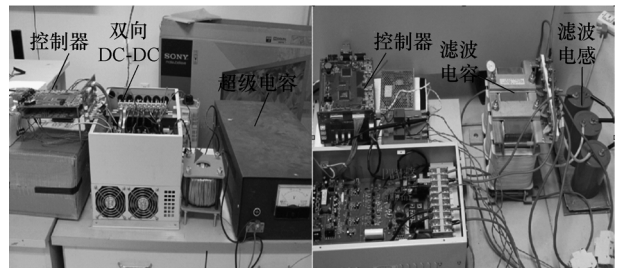


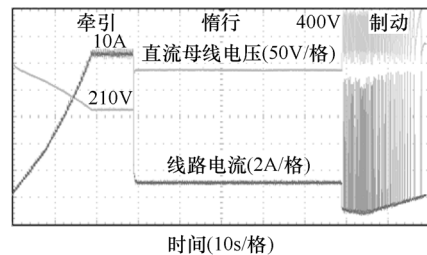
图13 3kW 实验平台

Fig.13 Prototype of 3kW supercapacitor platform

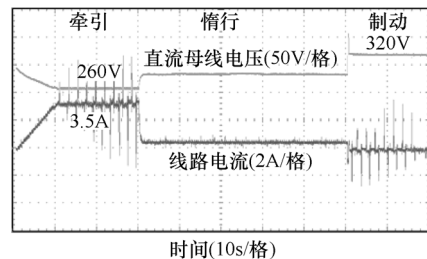
6.2 实验结果分析

实验对比投入和未投入超级电容器两种情况下直流母线电压和线路电流的波形如图 14 所示。

从图 14a 可以看出, 未投入超级电容器的情况下, 列车牵引时直流母线电压由 300V 跌落到 210V, 严重影响了列车牵引特性; 列车制动时, 直流电压泵升, 超过安全泄放电压 400V, 泄放保护, 电压波动 190V。图 14b 为投入超级电容器且采用间接电流控制方法, 从图中可知通过对线路电流的限制及电压动作值的设定, 列车牵引时直流母线电压仅跌落到



(a) 未投入超级电容时电压和电流波形



(b) 投入超级电容时电压和电流波形

图14 直流电压和线路电流

Fig.14 Line voltage and current waveforms

260V，制动时电压泵升到 320V，稳压作用明显，有效地防止再生失效。

7 结论

本文研究了车载超级电容储能系统能量管理问题，给出了超级电容电流环路设计方法，重点讨论了在单列车牵引及制动特性下的一种车载超级电容储能系统间接电流能量管理控制策略，通过此控制策略可以抑制受电弓处直流母线电压的波动，改善列车牵引及制动性能，防止再生失效，节约运行列车能耗。在后续的研究中还要针对多列车运行时电流限制曲线的设定进行研究。

参考文献

[1] Steiner M, Scholten J. Energy storage on board of railway vehicles[C]. European Conference on Power Electronics and Applications, 2005: 5-10.

[2] Ogasa M, Taguchi Y. Power flow control of trolley hybrid electric vehicles[J]. RTRI (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, 2010: 750-756.

[4] Steiner M, Klohr M, Pagiela S. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles[C]. European Conference on Power Electronics and Applications, 2007: 1-10.

[5] Spaeth H, Becker K P. Energy storage by capacitors[J]. European Transactions on Electrical Power, 2002, 12(3): 211-216.

[6] Umeda S, Ishii J, Nagaoka N, et al. Energy storage of regenerated power on DC railway system using lithium-ion battery[C]. The 2005 International Power Electronics Conf, 2005: 455-460.

[7] Hase S, Konishi T, Okui A, et al. Application of electric double-layer capacitors for energy storage on electric railway[J]. TIEE Japan, 2003, 123-D(5): 517-524.

[8] 蔡宣三, 龚绍文. 高频功率电子学直流-直流变换[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

作者简介

赵 坤 男, 1980 年生, 博士研究生, 研究方向为城市轨道交通制动及超级电容应用。

王 祺 榕 女, 1987 年生, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通超级电容应用。

(上接第 115 页)

[13] 陆海峰, 瞿文龙, 等. 一种基于无功功率的异步电机矢量控制转子磁场准确定向方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 116-120.

Lu Haifeng, Qu Wenlong, et al. A novel rotor flux oriented scheme of induction motor based on reactive power[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16):

116-120.

作者简介

周明磊 男, 1985 年生, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

游小杰 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动。