基于超级电容储能系统的电梯微网电压波动控制策略研究

陈　霞，陈　耀，高　健，徐　悦，刘洪晴，王　震
（山东科技大学 电气与自动化工程学院，山东 青岛 266590）

摘　要：针对电梯超级电容(SC)能量回馈系统(ERS)，设计了基于双模糊控制器与传统控制系统相结合的控制策略。两个模糊逻辑控制器(FLC)根据电网电压变化与充放电电流纹波，在线调整直流母线给定电压，并将调整的直流母线给定电压作为传统电压电流双闭环控制给定电压，作用于 DC-DC 变换器。仿真结果表明，这种控制策略能够降低电网能量消耗，提高电梯能量利用率。

关键词：超级电容；电梯；模糊控制器；DC-DC 变换器

中图法分类号：TM921　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-3767(2017)05-0072-08

DOI：10.16452/j.cnki.sdkjzk.2017.05.011

Control Strategy of Elevator Micro-grid Voltage Fluctuation Based on Supercapacitor Energy Storage System

CHEN Xia, CHEN Yao, GAO Jian, XU Yue, LIU Hongqing, WANG Zhen
(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Focusing on the control strategy of supercapacitor (SC) energy recovery system (ERS) in the elevator, this paper proposed a control strategy based on the combination of double fuzzy controller and traditional control system. According to the power grid voltage change and the charging and discharging current ripple, two fuzzy logic controllers (FLC) adjusted the given DC bus voltage online, and the adjusted given DC bus voltage was applied to DC-DC converter as the given voltage of the traditional voltage current double closed-loop control. Simulation results show that the control strategy can reduce the grid's power consumption and improve the elevator energy utilization.

Key words: supercapacitor; elevator; fuzzy controller; DC-DX converter

随着现代城市建筑群的不断增加，电梯作为高层建筑群的主要运输工具，其数量正在迅速增长。在整个建筑耗能中，电梯耗能远高于其他用电设备，占到整个建筑业耗能的 5%～15%，所以虽然电梯给人们的生活带来了方便，也带来了能源消耗方面的问题。在电梯中，制动产生的能量通过制动电阻消耗掉，虽保护了能量回馈电路，但造成了能量浪费[1-2]。目前对能量回馈研究主要有两种：一种是使用并网逆变器将多余能量回馈并网，可由独立 PWM 逆变器并联在整流器或采用双向 PWM 整流器实现；另一种方法为直流储能，将双向 DC-DC 变换器挂接在直流母线，回馈能量时将多余能量储存在储能元件中，耗能时再将能量释放到

收稿日期：2016-07-04
基金项目：山东科技大学研究生科技创新项目(YC150344)
作者简介：陈　霞(1968—)，女，山东青岛人，副教授，主要从事电力电子技术、电力系统及其自动化等方面研究.
E-mail：sdkdcx@126.com
陈　耀(1989—)，男，山东泗水人，硕士研究生，主要从事电力电子与电力传动、超级电容充放电等方面研究，本文通信作者. E-mail：727116182@qq.com

直流母线上利用。由于回馈并网电能难以保证与公共网的相位与频率相同，易对电网产生干扰，因此主要研究第二种能量回馈方式。

超级电容(supercapicitor，SC)因与一般化学电池相比，储能原理和外特性具有典型的电容特性，在充放电过程中，电压近似成线性增长和减少，适用于频繁应用的大功率充放电场合[3]。随着超级电容技术不断发展，将超级电容应用于电梯节能，已成为当前新的研究方向。通过阅读和研究国内外文献，发现很多研究忽略了电网电压波动对超级电容储能系统的影响[4]。传统非隔离型双向 DC-DC 电路的超级电容储能系统，常采用直流母线电压外环、电感电流内环的控制策略，主要用于抑制充放电电流纹波，但忽略了电网电压变化对储能系统影响[5]。文章[6]将传统非隔离型双向 DC-DC 电路应用于电梯制动能量回收系统(energy recovery system，ERS)中，并加入了模糊控制器(fuzzy logic controller，FLC)作用于控制系统，也未考虑电网电压波动对储能系统的影响。

基于上述研究，本文在传统控制方法基础上，设计了两个模糊控制器，即电压和电流模糊控制器。根据电梯的运行状态，模糊逻辑控制器根据反馈，在线调整直流母线给定电压，作用于储能模块。搭建仿真模型对比传统方法和模糊控制方法下的储能系统节能效果，仿真结果表明，加入模糊控制方法能抑制电网电压波动对储能系统的影响，提高储能系统节能效率。

1　系统结构组成和能量流动

基于超级电容储能式电梯能量回收系统结构图如图 1 所示，其包括轿厢、超级电容储能系统、制动电阻电路、电机变频器和电机。超级电容储能系统作为能量储存系统，由 SC 模块和双向 DC-DC 变换电路组成，与直流母线并联，实现能量的存储与释放；系统保留制动电阻电路作为保护电路，与直流母线连接；电机变频器作为电机驱动与电梯永磁同步电机连接。

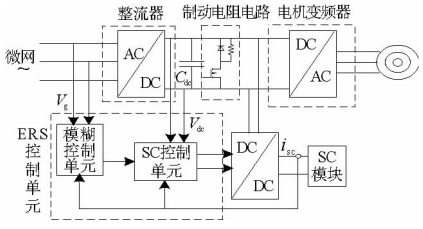

图 1　SC 储能式电梯能量回收系统结构图

Fig. 1　System structure of SC energy-saving

根据电梯运行方向与负载情况，消耗能量或产生能量。有如图 2 所示四种能量流动状态：(a)为当电梯处于耗能时，电梯运行所需要能量由电网与超级电容储能系统提供；(b)为在超级电容被充满时或停电时独自给电梯供电；(c)为电梯电机制动时，产生制动能量由超级电容储能系统吸收；(d)为当超级电容充满时，通过制动电阻电路消耗多余能量。

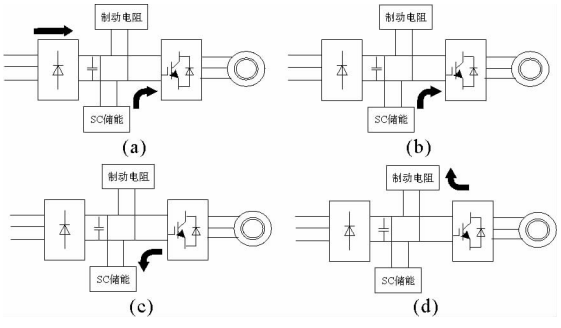

图 2　电梯运行时能量流动状态

Fig. 2　Energy flow in a motor drive system elevator energy recovery

2　电梯制动能量回收系统控制策略

2.1　能量回收系统控制单元

在传统系统中，直流母线给定电压是固定的，其值比变换器直流母线电压值高。当电网交流侧电压恒定不变时，超级电容储能系统可以获得期望运行模式；当电网交流侧电压变化时，虽然超级电容储能系统仍然能够吸收电梯制动能量和提供能量，却容易受到冲击并增加电网能量消耗。特别是，当电网交流侧电压增大时，直流母线给定电压低于变流器直流输出电压，尽管超级电容被充满电可以给电梯电机供电，电梯所需要能量主要由电网提供。当电网交流侧电压减少时，电网需要提供额外能量去跟踪直流母线给定电压。

传统控制结构包括两个 PI 控制器，分别控制直流母线电压 V_{dc} 与 DC-DC 变换器超级电容侧电流 i_{sc}，然后产生两路 PWM 脉冲信号控制 IGBT 开断。本文在传统控制结构上增加两个模糊控制器，分别控制电网电压和超级电容充放电电流[7-11]。电网电压模糊控制器，用来观察电网实际电压 V_g 和电网额定电压 V_g^* 的

差值 ΔV_g（$\Delta V_g = V_g - V_g^*$）；超级电容充放电电流模糊控制器控制电流纹波幅值，通过 z 变换观察现在与前一时刻幅值差 $\Delta I_s = I_s(z) - I_s(z^{-1})$。随着电梯不同运行状态下电网电压和充放电电流变化，以上两个模糊控制器在线调节给定直流母线电压 V_{dc}^*，其控制系统如图 3 所示。

直流母线电压 V_{dc}^* 由图 4 中控制算法决定，当电梯获得 Call 信号开始运行时，为了控制启动功率峰值，V_{dc}^* 为变换范围最大值。否则 V_{dc}^* 根据电梯运行模式和负载状况，通过增加 FO_I 在线调整 V_{dc}^*。然后通过 V_{dc}^* 和 FO_V 相比较，V_{dc}^* 大于 FO_V 时确定此时的 V_{dc}^* 为直流母线给定电压，否则将 FO_V 视为直流母线给定电压，最终确定给定直流母线给定电压幅值。

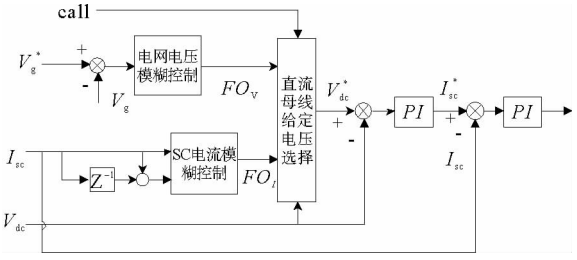

图 3　模糊控制系统单元

Fig. 3　Fuzzy logic control system element

2.2　模糊控制器

为了实现直流母线给定电压在线调整，本文采用专家经验法根据电梯运行的实际情况，设计了模糊控制器，其包括电压和电流模糊控制两个模块[12]。

电压模糊逻辑控制器是根据电网电压变换，调整直流母线给定电压 V_{dc}^*。输入模糊逻辑设置定义为 VL＝Very Low，L＝Low，N＝Normal，H＝High，VH＝Very High；输出模糊逻辑设置为 V＝Very Small，S＝Small，M＝Medium，B＝Big，VB＝Very Big。图 5 为模糊逻辑控制设置和每个信号对应数学模型，模糊控制规则结构为

If (error is VL) then (Out_1 is VS)
If (error is L) then (Out_1 is S)
If (error is N) then (Out_1 is M)
If (error is H) then (Out_1 is B)
If (error is VH) then (Out_1 is VB)

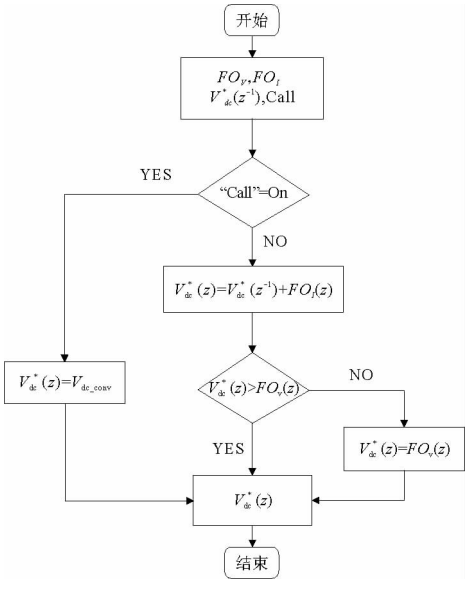

图 4　直流母线电压给定算法流程图

Fig. 4　Flow-chart of the algorithm for the reference dc-link voltage

电流模糊逻辑控制器是根据负载电路调整直流母线给定电压 V_{dc}^*。输入模糊逻辑设置定义为 N＝Negative，Z＝Zero，P＝Positive，Idle＝Idle mode，Generator operation 和 Generator＝Generator oeration；输出模糊逻辑设置定义为 D＝Derease，N＝Neutral，I＝Increase。

图 6 为模糊逻辑控制设置和每个信号对应的函数。

模糊控制规则结构如表 1 所示。

1）当电梯电机处于电动状态时，直流母线电压应该增加，PI 控制器用来控制，使超级电容模块给电梯提供最大能量。

2）当电梯电机处于制动状态时，直流母线电压应该减小，超级电容模块能量吸收率最大。

3）当电梯处于空闲模式时，直流母线电压设置在中间值。

表 1　SC 电流模糊控制规则表

Tab. 1　SC-current fuzzy rules

Is	ΔIs		
	M	I	B
N	I	I	N
Z	D	N	D
P	N	D	N

3　基于超级电容的双向 DC-DC 变换器

将通过模糊控制单元调整后的直流母线给定电压，作用于 DC-DC 变换器的双闭环控制中，完成超级电容的充放电。为了减小电流纹波延长超级电容使用寿命，变换器在储能过程中的作用尤为重要。

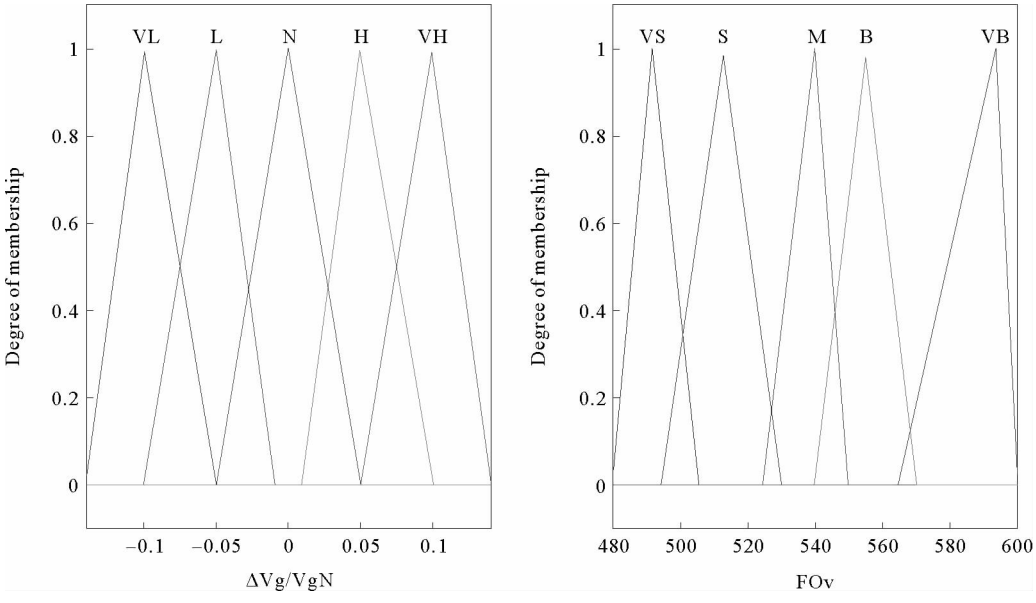

图 5　电网电压模糊控制器函数

Fig. 5　Grid voltage fuzzy controller function

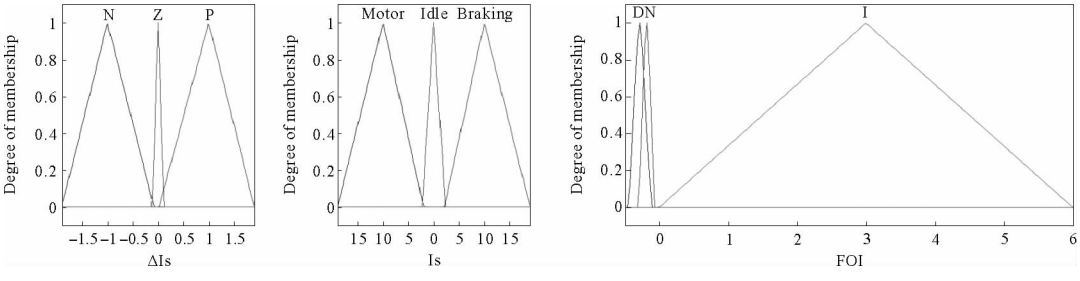

图 6　电流模糊控制器函数

Fig. 6　Current fuzzy controller function

从电梯储能装置对电压增益要求与成本方面考虑，选择非隔离双向 DC-DC 变换器。本文将超级电容等效为一个理想电容 C_{sc} 与等效电阻 R_{ep} 并联后再串联等效电阻 R_{es} [13]。双向 DC-DC 变换器储能系统电路模型如图 7 所示[14]。

设超级电容电压上下阀值：V_{max} 、V_{min} ，为了提高 SC 充电效率，防止充电和放电过度造成 SC 寿命缩短，超级电容电压的上下阀值的关系如式(1)，上下阀值电压的比值系数为 D 。

$$V_{min} = DV_{max}, D \geqslant 0.5 。 \tag{1}$$

超级电容能量存储系统可存储最大功率通过式(2)获得。

$$E_{max} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{max}^2 。 \tag{2}$$

根据超级电容电压阀值 V_{max} 与 V_{min} ，SC 储能系统最大吸收与释放功率满足式(3)。

$$E_{\mathrm{ERS}_{\max}} = \frac{1}{2}C_{\mathrm{sc}}(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)。\tag{3}$$

对于双向 DC-DC 变换电路，选取合适的电感 L 有利于控制充电电流纹波，L 可由式(4)计算获得。

$$L = \frac{V_{\mathrm{dc}}^2}{2P_s f_2} D(1\text{-}D_2)^2 \tag{4}$$

式中：P 为超级电容最大有功功率；f_2 为开关频率；D_2 取变换器工作在 Boost 电路模式下开关管 T_s 最小占空比[15]。

为了避免超级电容储能系统过热，影响能量存储容量和操作时间，必须控制超级电容电流纹波[16]。电流纹波在 DC-DC 变换器模式下计算公式为(5)。

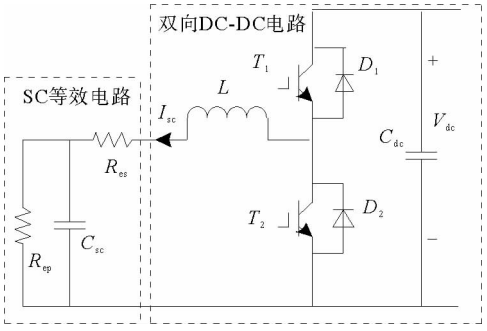

图 7　DC-DC 变换器电路模型

Fig. 7　Circuit model of DC-DC converter

$$\Delta I_{\mathrm{sc}} = \frac{V_{\mathrm{dc}}D(1-D)}{L}T_s \tag{5}$$

由公式(5)可以看出，L 和 T_s 是给定值，V_{dc} 可以用来减小超级电容电流纹波 ΔI_{sc}。因此，直流母线电压 V_{dc} 根据电梯运行状态进行调整，作为传统电压电流双闭环控制给定电压，减小超级电容电流纹波，保护超级电容。

4　仿真与分析

本文在 simulink 中搭建超级电容储能系统仿真模型，该模型主要由 DC-DC 变换器电路、模糊控制器，PI 控制器和超级电容等部分组成，如图 8 所示。对模糊控制方法下超级电容充放电进行仿真验证。仿真参数见表 2。

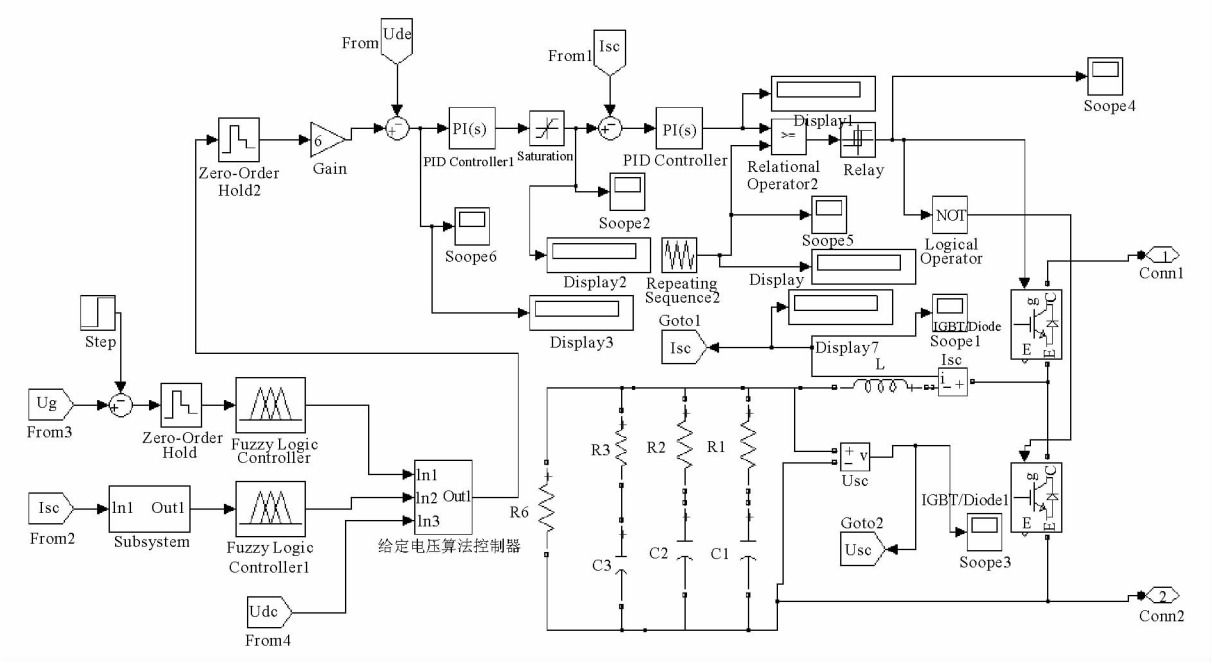

图 8　超级电容储能系统模型

Fig. 8　Supercapacitor energy storage control system model

电梯系统采用 4.5 kW 永磁同步电机，超级电容模块储能系统存储最大容量 40.4 kJ，*DC-DC* 电路载波频率为 20 kHz。电梯系统仿真参数见表 3。

表 2　储能系统参数

Tab. 2　Energy-saving system parameters

参数	数值
SC 容量/F	0.45
母线电容/mF	0.30
储能电感/mH	0.43
直流母线电压/V	480～600
SC 储能阀值/V	240～470

表 3　电梯系统参数

Tab. 3　Elevator system parameters

参数	数值
曳引机额定功率/kW	4.5
对重/kg	1 065
轿厢重/kg	750
最大负载/kg	630
电梯速度/(m/s)	1.6
电梯加速度/(m/s^2)	1

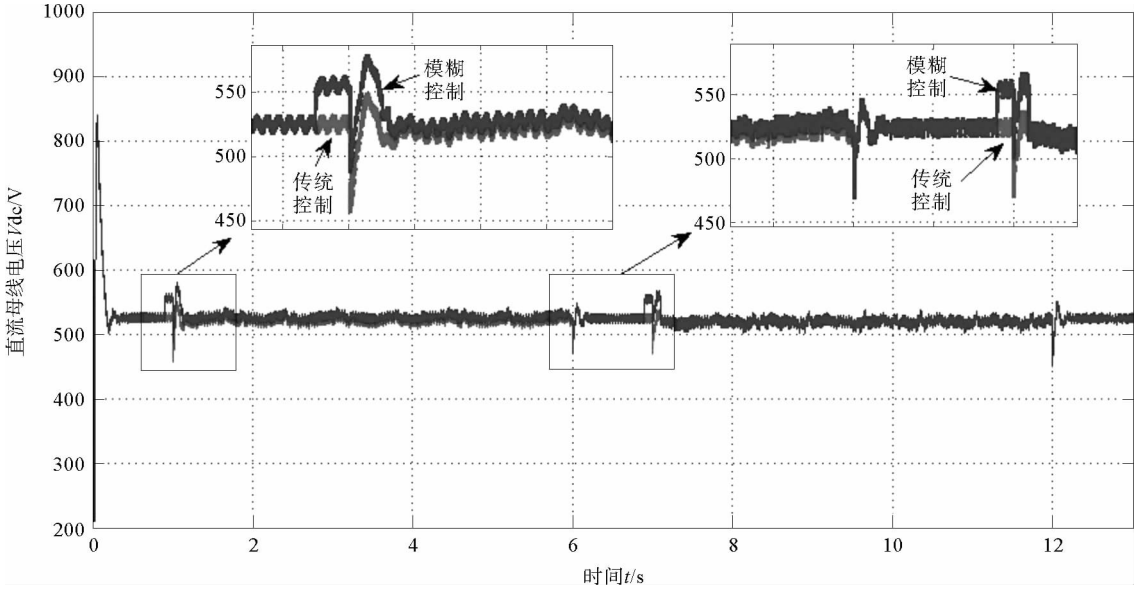

图 9　直流母线电压

Fig. 9　DC bus voltage

图 9 和图 10 为系统模拟电梯重载下行、上行时，在电网电压增加 5%的情况下，传统控制与模糊控制模式下对应的仿真波形，分别对应电梯运行制动、空闲和电动三种状态：

1）1～6 s 期间电梯为制动状态。首先对图 9 中的直流母线电压波形图进行分析，可看出模糊控制状态下直流母线电压有跳变，因此模糊控制器起到了抑制电网电压波动的作用；其次通过对比图 10 中传统和模糊控制下的超级电容充放电电压图可知，在传统控制方法下充电电压最低点 289 V 电压升高至 347 V，斜率为 11.6，电压升高了 58 V，在模糊控制方法下充电电压最低点 291 V 最高点 350 V，斜率为 11.8，电压升高了 59 V。由此可以看出模糊控制模式下超级电容充电效率大于传统模式下。

2）6～7 s 期间电梯为空闲状态，图 10 中在传统控制方法下电压为稳定值 345 V，在模糊控制方法下电压为稳定值 347 V，可以看出在模糊控制方法下电压稳定值相对于传统方法较高。

3）7～12 s 电梯为电动状态。同样首先对比图 9 中的直流母线电压波形，可看出模糊控制状态下直流

母线电压有跳变，模糊控制器起到了抑制电网电压波动的作用；其次通过对比图 10 中的超级电容充放电电压可知，在传统控制方法下放电曲线斜率为－14，电压放电前为 345 V，放电后变为 275 V，相比电压降低了 70 V，在模糊控制方式下放电曲线斜率为－15.5，电压放电前为 347 V，放电后变为 270 V，相比电压降低了 77V。由此可以看出模糊控制模式下超级电容放电效率大于传统模式。

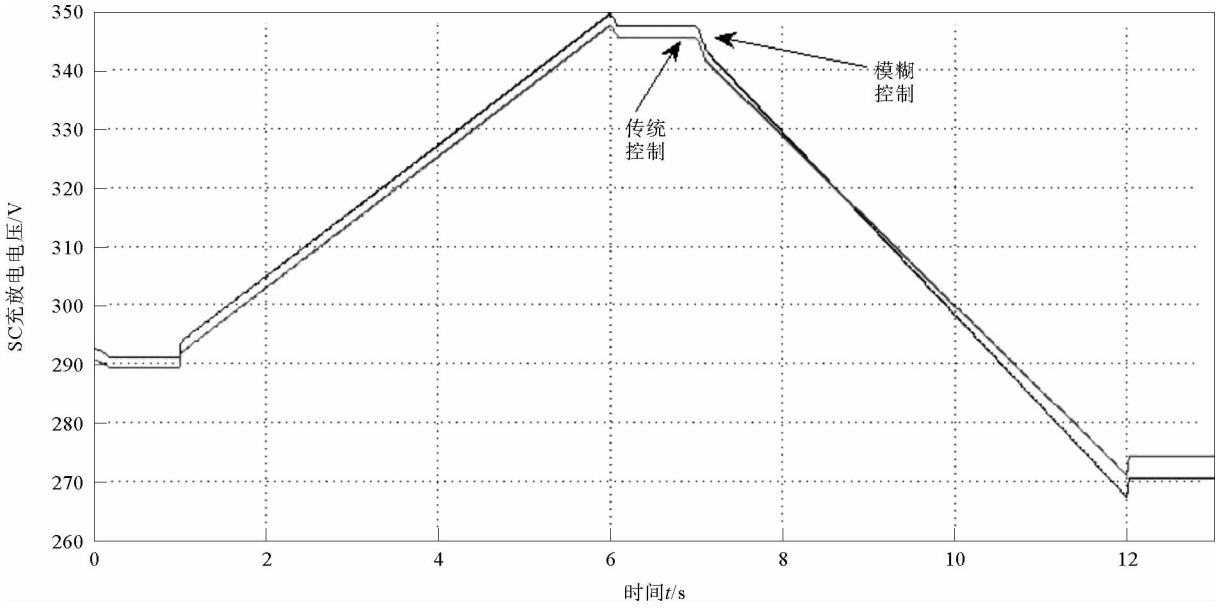

图 10　超级电容充放电电压

Fig. 10　Supercapacitor charge and discharge voltage

通过以上对储能系统传统控制方式与模糊控制方式比较可以看出，在电动状态时模糊控制方式下超级电容能够回馈更多的能量，同样在制动过程中模糊控制方式下超级电容能够吸收更多的制动能量，减少能量浪费，因此模糊控制方式下超级电容充放电量和充电速率都大于传统方式，提高超级电容充放电的效率。

5　总结

在传统超级电容储能控制系统基础上，针对电网电压波动导致的超级电容充放电效率降低的问题进行了研究分析和改进，在原储能系统的基础上增加两个模糊控制器。通过仿真结果表明：双模糊控制策略能够减小电梯微网中的电压波动对电梯储能系统影响，提升超级电容的储能供能效率，同时对能量回馈系统起到较好地保护作用，进一步优化了电梯制动能量回收系统，更好满足电梯节能需求。

参考文献：

[1]HE Jinping，MAO Chengxiong，LU Jiming. Design and implementation of an energy feedback digital device used in elevator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58(10)：4636-4642.

[2]LI Bin，Wan Jianru，LI Mingshui，et al. Research on elevator drive device with super capacitor for energy storage[C]//International Conference on Power Electronics Systems and Applications，IEEE，2011：1-5.

[3]罗志群，万健如，黄绍伦，等. 超级电容储能式电梯应用研究[J]. 电机与控制学报，2015，19(6)：55-60.
LUO Zhiqun，WAN Jianru，HUANG Shaolun，et al. Research and application to super-capacitor for elevator energy-saving [J]. Electric Machine and Control，2015，19(6)：55-60.

[4]余丽丽，朱俊杰，赵景泰. 超级电容器的现状及发展趋势[J]. 自然杂志，2015，37(3)：188-196.
YU Lili，ZHU Junjie，ZHAO Jingtai. The present situation and development trend of supercapacitors[J]. Chinese Journal of

Nature,2015,37(3):188-196.

[5]杨惠,孙向东,钟彦儒,等.基于双向 DC—DC 变换器的超级电容器储能系统研究[J].西安理工大学学报,2011,27(4):456-460.

YANG Hui,SUN Xiangdong,ZHONG Yanru,et al. Research on a super capacitor energy storage system based on bi-directional DC-DC converter[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2011,27(4):456-460.

[6]史俊霞.超级电容在电梯节能中的应用前景探讨[J].电气自动化,2013,35(1):69-70.

SHI Junxia. Super capacitor in the elevator energy conservation application prospect[J]. Electrical Automation,2013,35(1):69-70.

[7]LI Zheng,RUAN Yi. A novel energy saving control system for elevator based on supercapacitor bank using fuzzy logic[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems,2008(5):2717-2722.

[8]JABBOUR N,MADEMLIS C,KIOSKERIDIS I. Improved performance in a supercapacitor:Based energy storage control system with bidirectional DC-DC converter for elevator motor drives[C]//IET International Conference on Power Electronics,Machines and Drives (PEMD 2014),2014:1-6.

[9]PERRY A G,FENG G,LIU Y F,et al. A design method for PI-like fuzzy logic controllers for DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(5):2688-2696.

[10]JABBOUR N,MADEMLIS C. Supercapacitor-based energy recovery system with improved power control and energy management for elevator applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017(99):1-1.

[11]冀国郡,王云亮.基于模糊控制策略的超级电容节能电梯研究[J].电源技术,2016,40(8):1673-1674.

JI Guojun,WANG Yunliang. Study on control strategy of energy-saving elevator with super capacitor based on fuzzy control[J]. Chinese Journal of Power Sources,2016,40(8):1673-1674.

[12]陈雪丹,陈硕翼,乔志军,等.超级电容器的应用[J].储能科学与技术,2016,5(6):800-806.

CHEN Xuedan,CHEN Shuoyi,QIAO Zhijun,et al. Applications of super capacitor[J]. Energy Storage Science and Technology,2016,5(6):800-806.

[13]邓哲,周峰武,吕征宇.基于超级电容储能与电压型变流器的电梯能量回收系统效率优化控制策略[J].电工电能新技术,2014,33(2):22-28.

DENG Zhe,ZHOU Fengwu,LÜ Zhengyu. Optimal efficiency control strategy of elevator energy recovery system based on super-capacitor storage and VSC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2014,33(2):22-28.

[14]高明远.双向 DC-DC 变换器基于切换系统的建模与储能控制[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(3):129-134.

GAO Mingyuan. Modeling and energy storage control for bidirectional DC-DC converter based on switching system[J]. Power System Protection and Control,2012,40(3):129-134.

[15]马奎安.超级电容器储能系统中双向 DC/DC 变流器设计[D].杭州:浙江大学,2010.

[16]武伟,谢少军,张曌,等.基于组合型双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J].电源学报,2016,14(3):83-93.

WU Wei,XIE Shaojun,ZHANG Zhao,et al. Analysis and design of control strategy for MMC-BDC based ultra- capacitors energy storage systems [J]. Journal of Power Supply,2016,14(3):83-93.

(责任编辑:傅　游)