

基于神经网络预测控制的节能电梯能量管理*

张达敏¹, 林辉品², 林智勇¹, 徐敏¹, 吕征宇²

(1. 厦门理工学院 福建省高电压技术重点实验室 厦门 361024; 2. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

摘要:随着电梯的日益增多,电梯节能问题引起越来越多的关注。针对节能型电梯中超级电容的储能管理问题,提出一种基于神经网络预测控制策略的新方法来动态预测电梯运行中所需的能量。首先根据电梯当前停层、目的停层以及载荷信息,建立反向传播神经网络(BPNN)模型并通过样本训练确定各神经元的权值和偏置值,然后利用该模型在线预测电梯每个行程吸收或回馈的能量,据此调节超级电容的平衡电压实现提前储能/泄能,补偿电梯运行过程中所需的尖峰功率。此外,根据电梯载荷和行程信息动态调整超级电容的平衡电压,可以充分利用超级电容的能量存储空间,在某些行程下除了补偿尖峰功率,还能够补偿一部分额定功率,优化网侧整流器的功率容量。最后通过MATLAB/Simulink搭建的仿真平台和实验样机验证了本方法的可行性。

关键词:反向传播神经网络;预测控制;节能电梯;尖峰功率补偿

中图分类号:TH70 TM921 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:470.4061

Energy management of energy-saving elevator based on neural network predictive control

Zhang Damin¹, Lin Huipin², Lin Zhiyong¹, Xu Min¹, Lv Zhengyu²

(1. High-voltage Key Laboratory of Fujian Province, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The energy-saving issue attracts more and more attentions recently with the increasing installations of the elevators in the buildings. And super capacitors (SUPCAPs) are the preferred energy-conserving devices equipped in the elevators to store the energy regenerated by the tracking motor. A new back propagation neural network based (BPNN-based) predictive control strategy is employed to predict the energy required by the elevator at every trip. According to the information of the current stop floor, the destination floor, and the weight of the passengers, the BPNN model is setup and trained by the samples. Then the trained BPNN is applied to predict the energy required by the elevator at the beginning of each trip. In this way, the energy provided by the SUPCAPs is determined and the balance voltage (BV) can be regulated to fully compensate the peak power. Moreover, the power capacity of the grid-side pulse-width modulation (PWM) rectifier can be reduced because the SUPCAPs provide as much energy as possible in every trip. Not only the peak power which emerges when the elevator moves in heavy load or full load eliminated, but also the rated power can be partly counteracted by the SUPCAPs. Finally, a simulation based on MATLAB/Simulink as well as the corresponding experimental prototype is setup to verify the proposed method, and results from the simulation and experiments prove the effectiveness of the proposed method.

Keywords: back propagation neural network (BPNN); predictive control; energy-saving elevator; compensation of peak power

0 引言

随着高层建筑的不断增多,电梯作为楼宇内便捷的

交通工具,已成为高层建筑和公共场所中不可或缺的电气设备。根据国家质检总局的统计数据,截至2016年底,我国电梯保有量已达493.69万台,其耗电量占楼宇总用电量的17%~25%,已成为仅次于空调的第二大用

电设备^[1]。因此,研究开发节能型电梯具有显著的经济和社会效益。

电梯运行过程中由于负载位能和动能的变化,在某些运行工况下处于回馈制动状态。传统电梯通常采用二极管整流器作为网侧变流器,具有结构简单、控制参数少的优点。但是电梯工作时网侧将产生大量的谐波,引起谐波污染。并且曳引电机回馈的能量无法逆变到电网中,能量堆积于直流母线中容易造成母线电压升高,需要并联大功率泄放电阻吸收多余的能量,造成能源的极大浪费。为了降低网侧谐波并利用电机回馈的能量,采用脉冲宽度调制式(pulse width modulation, PWM)整流并结合储能装置成为当前节能型电梯的发展趋势^[2-3],随着储能技术的不断发展,利用蓄电池、飞轮、超导和超级电容等储能设备吸收电机制动回馈的能量受到重视^[4-5]。与其他几种储能元件相比,超级电容储能不需要能量形态的转换,因此具有更高的储能效率^[6],使之成为最具发展潜力的储能装置并广泛应用于电梯中^[7-9]。

为了利用电梯制动回馈的能量,文献[10]以负载电流和超级电容的剩余电量为输入变量,设计模糊逻辑控制器调节超级电容的储能,对减少电网用电有一定效果,但是没有考虑尖峰功率补偿及储能优化问题。文献[11]以电梯的最大行程、最大载荷工况来确定超级电容的容量,当电梯运行于其他工况时,超级电容的储能空间无法得到充分利用。为了优化储能,基于神经网络预测控制,本文提出一种动态调整超级电容储能的新方法。根据电梯的行程和载荷信息预测当前行程电梯所需功率,提前配置超级电容的储能空间,实现电梯运行过程中尖峰功率的补偿。

1 电梯运行功率流分析

图1所示为配备储能装置的节能型电梯曳引系统结构。在整流器和逆变器之间安装储能装置,用以吸收电梯制动时回馈的能量。当电梯处于电动状态时,储能装置可以释放能量补充直流母线,从而减少网侧能量输出,达到节能目的。电梯运行时,消耗的功率包含两部分,一部分为电梯动能相关的质量引起的功率,另一部分为绝对重力依行程的变化产生的功率^[12]。不考虑储能装置时,电梯运行消耗的功率可视为电网(或电梯功率处理单元)应该提供的功率。因此,当电梯处于电动运行状态时,其所需功率(包含尖峰功率)全部由整流器提供。

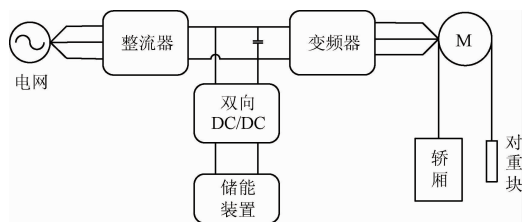


图1 电梯曳引系统结构

Fig. 1 Block diagram of the track system of the elevator

图2所示为电梯重载(0.75 p. u.)运行时功率随时间的变化曲线。由图2可见,当电梯带重载上升时,除了从电网吸收额定功率之外,还需要吸收正的尖峰功率;同样地,当电梯带重载下行时,将吸收负的尖峰功率(即回馈功率),若此瞬时大功率涌入电网,容易造成电网电压的大幅波动,影响电网中其他负载的正常运行。若该尖峰功率完全由电网提供/吸收,则网侧整流器的功率容量必须满足尖峰功率的要求。若采用超级电容等储能装置来提供/吸收这部分尖峰功率,则可以减小电网电压波动以及网侧整流器的功率容量。

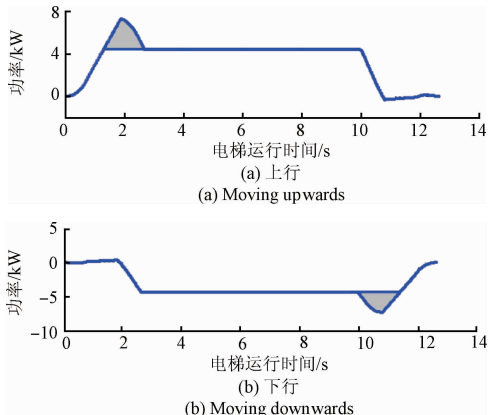


图2 电梯运行功率示意图

Fig. 2 Power illustrations of the elevator with heavy load

2 超级电容充能量管理分析

为了维持直流母线电压的相对稳定,超级电容与直流母线间需要一个双向DC-DC功率处理电路,如图3所示^[11]。

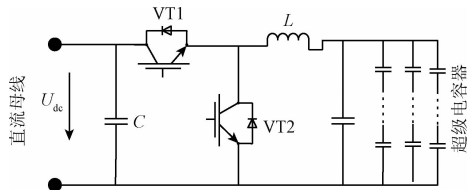


图3 带双向DC-DC变换器的电梯功率电路拓扑
Fig. 3 Main topology of the power circuit with bidirectional DC-DC converter

考虑到超级电容的性能和使用寿命,一般将超级电容的充放电电压限定在某一个区间内,即固定超级电容端电压的上下限。因此,可以通过调节超级电容的平衡电压来调整超级电容的储能。如果将平衡电压设定为某个固定值,那么电梯在每个行程中,超级电容将吸收恒定的能量,这样无法最大化利用超级电容的储能。除了吸收尖峰功率之外,若超级电容还有容量剩余,那么还可以吸收一部分网侧整流器吸收的功率。若此,不仅可以减小尖峰功率对电网的冲击,网侧 PWM 整流器的额定容量也可以进一步下降。要实现上述目的,则需要根据电梯每次的行程距离、运行方向及载重情况,提前预测电梯所需的恒定功率及尖峰功率。这样 PWM 整流器只需提供一部分功率(低于额定功率),其余功率(包括尖峰功率)由超级电容提供,如图 4 所示。

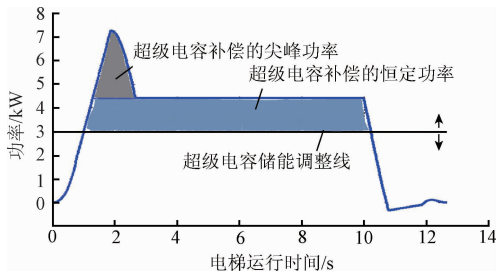


图 4 超级电容参与补偿电梯尖峰功率示意图
Fig. 4 Compensation of the peak power by the super capacitors

鉴于神经网络具有的全局逼近能力,以及在系统辨识和复杂非线性动态系统控制中的成功应用^[13-17],本文提出利用反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)来动态预测超级电容的储能。采用神经网络构造预测控制器来提前配置超级电容的储能,并反推得到超级电容的起始与终止电压,实现动态调节超级电容的储能。以电梯重载上行为例,当电梯控制器接收的指令显示电梯即将从底层以满载往顶层运动,电梯在此行程中需要消耗较大的功率,并且存在尖峰功率,通过 BPNN 提前预测电梯耗能量并使超级电容提前储备能量;反之,当电梯控制器接收的指令显示电梯即将从顶层以满载功率往底层运动,此行程中电梯将回馈较大的功率, BPNN 提前预测电梯回馈的能量并及时调整超级电容的平衡电压,确保超级电容有足够容量吸收当前行程电梯回馈的能量,超级电容无法吸收的能量再通过网侧 PWM 整流器回馈到电网,因此 PWM 整流器只需处理一部分功率(低于额定功率),这对于网侧 PWM 整流器的功率容量、开关损耗和谐波抑制都有益处,基于 BPNN 预测控制框图如图 5 所示。

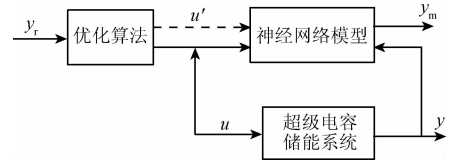


图 5 神经网络模型模型预测控制原理
Fig. 5 Block diagram of the predictive control based on BPNN

3 仿真与实验分析

根据电梯的运行速度和功率关系,在 MATLAB/Simulink 中搭建基于超级电容储能的电梯运行模型,并利用 BPNN 预测超级电容的储能,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数
Table 1 specifications of the simulation model

名称	参数	名称	参数
楼层数	16	层高	3 m
最大加速度	0.8 m/s ²	电机曳引比	2:1
加速度变化率	1 m/s ³	轿厢总质量	1 000 kg
对重平衡系数	0.5	对重总质量	1 500 kg
额定电压/功率	380 V/8.7 kW	曳引轮等效质量	80 kg
额定负载	1 000 kg	额定线速度	1.5 m/s
超级电容模块	0.625 F/800 V	额定转矩	560 N·m
直流母线电压下限	640 V	直流母线电压上限	700 V

本文采用的 BPNN 模型如图 6 所示,模型包含 3 个输入变量,分别为电梯的当前停层 F_a 、目的停层 F_b 和载荷百分比 k_r (用标幺值表征),隐含层个数为 22。输出变量为超级电容吸收的能量 W_{cap} 。采用 BPNN 预测控制的目的是获得超级电容在电梯的每个行程中需要释放或吸收的能量,即 W_{cap} 与电梯当前停层、目的停层及载荷百分比之间的关系。根据电梯不同的行程和载荷信息,获取训练样本 462 组,将此训练样本用于图 7 所示的 BPNN,训练的均方根误差如图 7 所示。由图 7 可见,经 153 次迭代后,训练样本和测试样本的均方根误差为 1.257%。图 8 所示为电梯带额定负载从第 16 层下行至第 1 层的电机消耗功率、网侧整流器功率和超级电容功率曲线。由于曳引电机处于制动状态,并且此行程距离最长,因此回馈的功率最多。图 8(a)所示为电梯下行时回馈的功率随时间的变化曲线,当电梯进入 3 段速的减速阶段时,出现负的尖峰功率,达到 5.85 kW,远超网侧 PWM 整流器的额定功率。图 8(b)所示为经过超级电容吸收部分功率后剩余的功率,此功率通过整流器回馈到电网。图 8(c)所示为超级电容吸收的功率,尖峰功率完全由超级电容吸收存储。

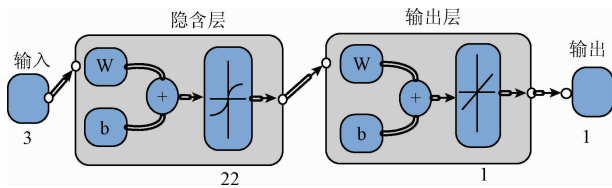


图6 本文构造的BPNN模型

Fig. 6 Constructed model based on BPNN

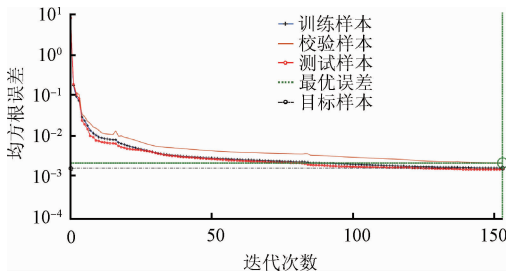


图7 迭代次数与均方根误差关系

Fig. 7 Relationship between root-mean-square error and the iterations

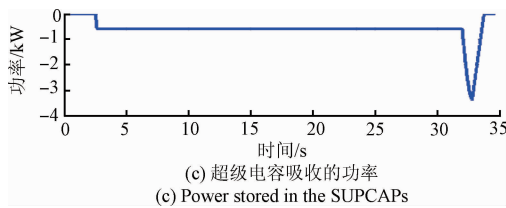
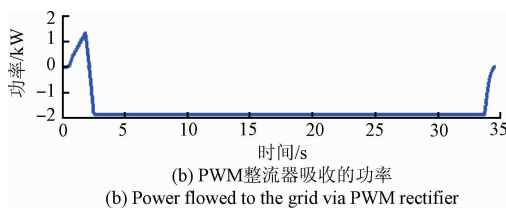
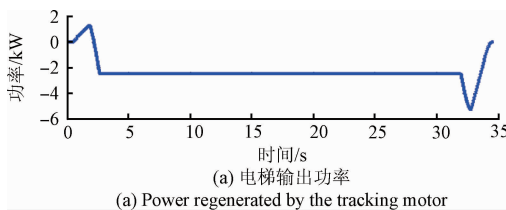


图8 电梯重载下行时的功率曲线

Fig. 8 Power plots of the moving elevator in heavy load

为了验证神经网络的训练样本是否足够,随机选取9组数据(与训练样本数据不同)来验证BPNN的泛化能力,测试样本数据如表2所示。采用BPNN预测超级电容存储能量误差最大值为1.25 kJ,以该样本(表2中样本1)为例,假定超级电容初始电压 $U_{c,0} = 640$ V,通过BPNN预测的超级电容初始电压为643.12 V,因此电压误差为3.12 V。其他样本对应的电压误差如图9所示,

其中样本5、7的预测值与理论值存在一定误差(误差电压小于3.12V),这是由于在接近平衡负载的工况下,对样本进行线性变换等预处理会导致样本数据失真。

表2 BPNN泛化能力测试数据

Table 2 Data used to verify the BPNN's generalization ability

样本编号	当前楼层	目标楼层	载荷比	W_{ct}	W_{BPNN}	ΔW
1	1	15	0.8	21.24	22.49	-1.25
2	16	3	0.85	21.27	21.42	0.15
3	16	10	0.1	21.33	20.8	0.53
4	1	15	0.36	21.29	21.66	0.36
5	1	14	0.68	21.29	20.54	0.76
6	16	12	0.17	21.33	21.34	-0.01
7	14	2	0.67	-21.32	-20.19	-1.13
8	2	13	0.94	21.19	21.74	-0.55
9	16	2	0.22	21.31	21.18	0.13

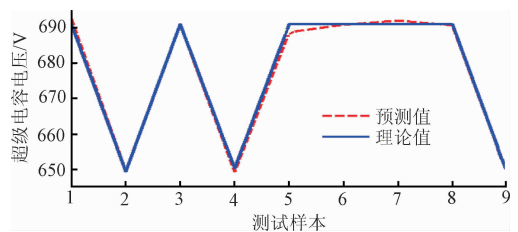


图9 直流母线电压理论计算值与BPNN预测值比较

Fig. 9 Comparisons of theoretical voltage and the predicted voltage

在仿真分析基础上,利用一台电梯样机进行算法验证。采用永磁同步电机作为曳引机,实验样机参数设置如表3所示。永磁同步电机采用 $i_d = 0$ 控制策略,因此其电磁转矩与交轴电流 i_q 呈线性关系。图10所示为电梯上行并且带0.75 p. u. 负载时测取的运行速度和加速度曲线,电梯运行楼层数为3层(高度9 m),图中加速度曲线由交轴电流 i_q 换算得到,由于曳引轮摩擦力、转动惯量和负载转矩测量存在误差,导致实际的加速度曲线与理论值有一定的偏差。

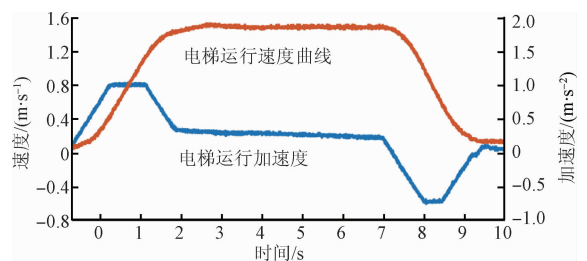


图10 电梯运行速度和加速度

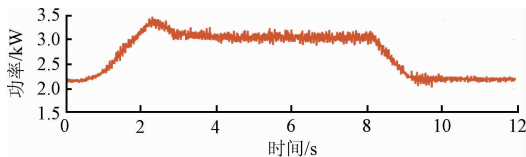
Fig. 10 Velocity and acceleration of the elevator

图 11 所示为网侧 PWM 整流器输出功率曲线,电梯满载运行(1 p. u.),从 1 楼运行到 5 楼,其中图 11(a)所示为未采用超级电容等储能装置补偿功率时 PWM 整流器输出的功率曲线,图中可见电梯速度达到最大时出现正功率尖峰。图 11(b)所示为采用本文提出的 BPNN 预测控制策略后网侧 PWM 整流器输出的功率曲线,该曲线通过 PWM 整流器的直流电流换算得到。当载荷和运行距离相同时,采用本文提出的储能动态调整方法,不仅可以补偿 PWM 整流器输出的尖峰功率(峰值功率 3.5 kW,补偿后整流器输出最大功率 3.0 kW),还可以补偿 PWM 整流器提供的部分恒定功率(约 400 W)。图 1 所示 2 为直流母线电压对比实验,由图 12 可见,采用 BPNN 动态调整超级电容的储能使之补偿直流母线功率,直流母线电压波动幅度减小,母线电压基本保持稳定。

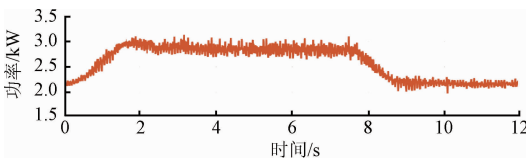
表 3 实验参数

Table 3 Experiment parameters

名称	参数	名称	参数
楼层数	12	电机曳引比	2:1
电机绕组联结方式	星型	轿厢总质量	1 000 kg
电机电极对数	10	对重总质量	1 500 kg
额定电压/功率	380 V/8.7 kW	额定负载	1 000 kg
超级电容单体	100 F/2.5 V	额定转矩	560 N·m
单体电容等效内阻	5 mΩ	最大加速度	0.8 m/s ²
超级电容单模组	1.25 F/200 V	加速度变率	1 m/s ³
超级电容模块	0.625 F/800 V	额定线速度	1.5 m/s



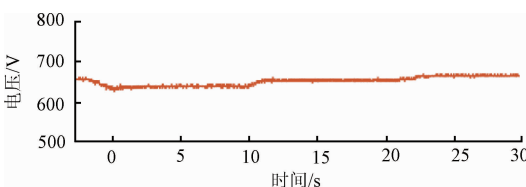
(a) Using no energy-storage device to compensate peak power



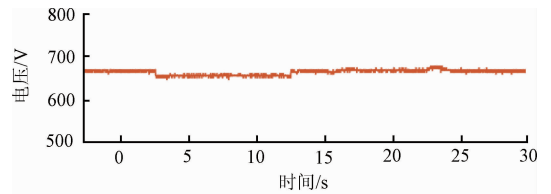
(b) Using BPNN to predict the energy stored in the SUPCAPs

图 11 网侧 PWM 整流器输出功率对比

Fig. 11 Power comparisons of the grid-side PWM rectifier



(a) Using no energy-storage device



(b) Using BPNN to predict the energy stored in the SUPCAPs

图 12 直流母线电压对比实验

Fig. 12 Comparison of DC Bus voltages

4 结 论

基于 BPNN 预测控制,提出一种动态调整电梯系统中超级电容储能的新方法。根据电梯的行程和载荷信息,BPNN 预测控制器提前预测电梯每个行程周期所需的功率以及尖峰功率,并据此调节超级电容的储能。除了补偿电梯运行中出现的尖峰功率,避免尖峰功率对网侧整流器的冲击之外,还可以补偿一部分额定功率,减少网侧 PWM 整流器的功率容量。仿真和样机实验验证了本文所提方法的有效性。

参考文献

[1] 周小杰,曹大鹏,阮毅. 超级电容储能装置在电梯中的研究与实现[J]. 电力电子技术. 2011, 45(1):101-103.
ZHOU X J, CAO D P, RUAN Y. Study and implementation of the super capacitor energy storage for the elevator [J]. Power Electronics, 2011, 45(1):101-103.

[2] RODRIGUEZ J R, DIXON J W, ESPINOZA J R, et al. PWM regenerative rectifiers: State of the art[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1): 5-22.

[3] 洪小圆. 基于永磁同步电机的电梯运动控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
HONG X Y. Research on elevator motion control based on permanent magnet synchronous motor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[4] HEBNER R, BENO J, WALLS A. Flywheel batteries come around again [J]. Spectrum, 2002, 39(4): 46-51.

[5] 林仕立,宋文吉,冯自平,等. 地铁混合储能系统及其功率动态分配控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2829-2835.
LIN SH L, SONG W J, FENG Z P, et al. Hybrid energy storage system of metro and its control method on power dynamic allocation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2016, 37(12): 2829-2835.

[6] KAFALIS K, KARLIS A D. Comparison of flywheels and supercapacitors for energy saving in elevators[C]. IEEE

- Industry Applications Society Annual Meeting, 2016: 1-8.
- [7] 刘博宇. 基于超级电容的电梯节能控制系统研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
LIU B Y. Design of energy-saving control system for elevator based on super capacitor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [8] 陈迪. 双向 DC-DC 变换器及其在节能电梯系统中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
CHEN D. Research on bidirectional DC-DC converter and its application on energy saving elevator system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [9] 林尧, 刘艳斌, 陈泰潮. 电梯混合能源节能系统的集成控制研究[J]. 自动化仪表. 2016, 37(3): 90-94.
LIN Y, LIU Y B, CHEN T C. Research on the integrated control of the elevator hybrid energy-saving system[J]. Process Automation Instrumentation. 2016, 37(3): 90-94.
- [10] 冀国郡. 基于模糊控制的具有超级电容的节能电梯的控制策略的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
JI G J. Research of control strategy for energy-saving electricity with super capacitor base on the fuzzy control[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
- [11] 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 ZH Q, WAN J R, HUANG SH L, et al. Research and application to super-capacitor for energy-saving elevator [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(6): 55-60.
- [12] 瞿博. 带超级电容的馈能型电梯能量管理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
QU B. Research on regenerative elevator with supercapacitor-based energy storage system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [13] 彭勇刚, 韦巍, 王均. 时滞约束系统的神经动态优化模型预测控制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 961-966.
PENG Y G, WEI W, WANG J. Model predictive control of time-delayed restraint system based on neuro dynamical optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2013, 34(5): 961-966.
- [14] 孙晶晶, 静大海. 基于神经网络复杂背景下车牌识别系统的研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(8): 22-25.
SUN J J, JING D H. License plate recognition system under complicated background based on neural network research[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(8): 22-25.
- [15] 陈志轩, 周大可, 黄经纬. 基于卷积神经网络的表情不变三维人脸识别[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 157-161.
CHEN ZH X, ZHOU D K, HUANG J W. Expression invariant 3D face recognition using convolutional neural networks [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(4): 157-161.
- [16] 王新, 候风艳. 基于改进的 PSO-BP 神经网络的无刷直流电机控制[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 10-14.
WANG X, HOU F Y. Control of brushless dc motor based on improved PSO-BP neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(2): 10-14.
- [17] 黄欣, 赵锦成, 解璞. 基于 BP 神经网络的电站负荷预测仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 41-43.
HUANG X, ZHAO J CH, XIE P. Simulation study on power station load forecasting based on BP neural network[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(10): 41-43.

作者简介



Zhang Damian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huaqiao University in 2006, M. Sc. degree from Xiamen University in 2009 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2013. He is currently an associate professor in Xiamen University of Technology. His main research interest is renewable energy technology.



Lv Zhengyu received his B. Sc. degree from Hohai University in 1982, Ph. D. degree from Zhejiang University in 1987. Now he is a professor in Zhejiang University. His main research interests include power electronic system integration, high-frequency power conversion and system control.

张达敏 (通讯作者), 2006 年于华侨大学获得学士学位, 2009 年厦门大学获得硕士学位, 2013 年于浙江大学获得博士学位, 现为厦门理工学院副教授, 主要研究方向为新能源发电技术。

E-mail: hqxmzj@sina.com

吕征宇, 1982 年于河海大学获得学士学位, 1987 年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江大学教授, 主要研究方向为电力电子系统集成、高频开关功率变换与系统控制技术。

E-mail: eeluzy@cee.zju.edu.cn.