

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.034

基于改进最小二乘法的超级电容器特征参数辨识

赵 洋^{1,2}, 孙家南², 姜 鸣¹

(1. 东莞理工学院电子工程学院, 广东 东莞 523808; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 准确辨识超级电容器特征参数值是分析超级电容器电气特性和估计其健康状态的重要研究基础。为克服采用阻抗谱分析法辨识特征参数所需激励信号幅值过小, 且不能反映研究对象真实工况以及难以实现在线辨识特征参数的缺点, 文中采用递推最小二乘法解决此问题。基于实验分析结果发现直接采用该算法辨识出的参数值与真实值差异较大, 因此在深入分析辨识算法的基础上, 对最小二乘法的辨识结构加以改进。实验和仿真分析结果表明, 基于改进后的最小二乘法辨识得到的超级电容器特征参数值更加准确和可信。

关键词: 超级电容器; 改进最小二乘法; 特征参数; 等效电路模型; 参数辨识

Characteristic Parameters Identification of Supercapacitor Based on Improved Least Square Method

ZHAO Yang^{1,2}, SUN Jianan², JIANG Ming¹

(1. College of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Guangdong Dongguan 523808, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Identifying the super capacitor's characteristic parameters correctly is the key research basis for analyzing the super capacitor's electrical performance and estimating its state of health. In order to overcome the impedance spectroscopy method's disadvantages, such as its stimulating signal amplitude is too low to depict the research object's real working condition, and it is hard to realize online parameter identification, the recursive least square method is adopted in the paper. Based on the test results, large differences between the identified parameters' values and its real values can be observed. So the identification structure of the method on the basis of deep analysis of the least square method is improved. The experimental and simulation results show that, based on the improved recursive least square method, the characteristic parameter identification values are more correct and credible.

Key words: super capacitor; improved least square method; characteristic parameter; equivalent circuit model; parameter identification

0 引言

随着风能和太阳能等新能源在分布式发电系统中的广泛应用, 其随机波动性和间歇性等问题对分布式发电系统经济运行和电能质量造成的负面影响已成为一项关键问题^[1]。为解决此问题, 采用先进的储能器件构成电能存储系统与风能或太阳能

发电系统进行互补已成为一种重要的解决方案, 并日益成为支撑新能源发电技术发展的关键技术^[2]。在此背景下, 各种电能存储器件如: 燃料电池、锂离子电池和超级电容器等^[3-7]受到研究人员的广泛重视。其中, 超级电容器与其他储能器件相比具有功率密度大、工作温度范围宽和循环寿命长^[8]等优点, 因而在可再生清洁能源发电^[9]、电压补偿^[10]和电机制动能量回收^[11-12]等领域具有广阔的应用前景。

收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51407031); 东莞市社会科技发展项目资助(2013108101007)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51407031), Project of Social Development of Science and Technology of Dongguan City(2013108101007).

在实际应用中,受超级电容器单体工作电压和容量的限制,通常需由大量单体串联构成储能系统^[13]。由于超级电容器单体的电气特性会受到工作环境温度、充放电电流倍率、单体不一致性和循环使用次数等因素的影响而逐渐发生性能退化,相应地整个储能系统的可靠性和使用寿命也将逐渐降低。因此,为提高储能系统工作的安全性和可靠性,需要实时准确地了解超级电容器单体的电气性能。由于超级电容器单体电气性能的变化程度本质上可以通过其模型特征参数的数值变化情况来看,即特征参数发生改变意味着超级电容器的电气性能也发生改变。因此准确估计超级电容器特征参数的具体数值是对超级电容器进行性能分析与优化和评估其当前健康状态(state of health, SOH)^[14]的研究基础,因而具有重要的理论意义和实用价值。

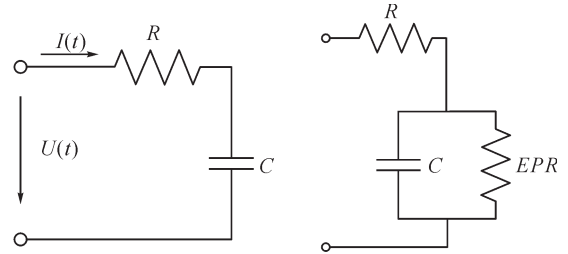
目前,国内外研究人员主要采用阻抗谱分析法^[15-16]来分析超级电容器的性能。由于该方法所采用的测试激励信号幅值的等级(10 mV)相对于超级电容器在实际应用中的工作电流信号等级要低很多,因此其参数辨识结果不能准确反映超级电容器在实际工况下的电气性能^[17-19]。并且该方法要求在测试前超级电容器已经处于静态条件,因而在实际应用中也难以实现特征参数的在线辨识。此外,该方法还需要专用的测试设备。为克服该方法的缺点,文中采用递推最小二乘法来辨识超级电容器的特征参数值。通过实验验证发现直接采用递推最小二乘法辨识得到的特征参数与其真实值有较大误差,不能描述超级电容器真实的电气性能。为此,在对最小二乘法深入分析的基础上,将其辨识结构加以改进,使得特征参数的辨识精度有很大提高,能正确描述超级电容器的电气特性,实验和仿真结果证明了该方法的可行性和有效性。

1 超级电容器寿命特征参数描述

超级电容器的特征参数可以定义为等效电容 C 和等效串联电阻 (equivalent series resistance, ESR)。其中,等效电容用于描述超级电容器的储能特性,等效串联电阻则用于描述超级电容器在充放电起始和结束时刻的电压突变,同时还可以反映出超级电容器的充放电效率和热特性^[20]。美国 Maxwell 公司利用该特征参数值作为估计超级电容器使用寿命的依据,并对这两个寿命参数定义为:当电容值 C 降至标称值的 80% 或等效串联内阻 ESR 增加到标称值的一倍,则认为超级电容器的使用寿命终结^[21]。

进行参数辨识的前提是需要先确定待辨识对

象的模型。根据前述超级电容器特征参数的定义可以画出超级电容器的等效电路模型如图 1(a)所示。其中, R 代表等效串联电阻, C 代表等效电容。该模型实际上是文[16]提出的经典等效电路模型(如图 1(b)所示)的简化结果。由于该模型中的等效并联电阻 (equivalent parallel resistance, EPR) 主要反映超级电容器在长时间静置时的自放电特性,因此在研究充放电时的电气特性时可以认为其不起作用。



(a) 超级电容器等效电路模型 (b) 经典等效电路模型

图 1 超级电容器等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of supercapacitor

2 参数辨识算法与实现步骤

针对参数辨识问题,最小二乘法是应用最广泛的一种方法。最小二乘法的实现主要包括一次完成算法和递推算法两种方式。其中一次完成算法需要事先获得所有输入和输出数据,并且只能实现离线辨识方法。由于在实际应用中更希望能实时获得超级电容器当前的使用状态,因此文中采用递推最小二乘(recursive least square, RLS)法^[22]解决超级电容器特征参数辨识问题。

2.1 递推最小二乘法

递推的最小二乘法的基本思想是

$$\text{新估计值 } \hat{\theta}(k) = \text{老估计值 } \hat{\theta}(k-1) + \text{修正值} \quad (1)$$

即新的估计值 $\hat{\theta}(k)$ 是在老估计值 $\hat{\theta}(k-1)$ 的基础上,利用该次观测数据对老估计值 $\hat{\theta}(k-1)$ 进行修正而成的。

最小二乘算法辨识对象的模型结构为

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^n b_i u(k-i) + \xi(k) \quad (2)$$

式(2)中: $u(k)$ 为模型输入信号; $y(k)$ 为输出信号; $\xi(k)$ 为随机噪声; a_i 和 b_i 为待辨识的模型参数,记为 $\theta = [a_i, b_i]^T$ 。

则递推最小二乘算法可总结如下

$$\begin{cases} K(k) = P(k-1)\phi(k)[\phi^T(k)P(k-1)\phi(k)+1]^{-1} \\ \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ P(k) = P(k-1) - K(k)K^T(k)[\phi^T(k)P(k-1)\phi(k)+1] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $\hat{\theta}(k)$ 即为待辨识参数的估计值; $K(k)$ 和 $P(k)$ 为推导最小二乘递推公式所引入的中间参量。

在进行递推计算时需要首先确定初始状态 $\hat{\theta}(0)$ 和 $P(0)$ 。它们的取值可直接取为

$$\begin{cases} P(0)=a^2I & a \text{ 为充分大的实数} \\ \hat{\theta}(k)=\varepsilon & \varepsilon \text{ 为充分小的实向量} \end{cases} \quad (4)$$

递推算法的停机标准可选为

$$\max_{\forall i} \left| \frac{\hat{\theta}_i(k) - \hat{\theta}_i(k-1)}{\hat{\theta}_i(k-1)} \right| < \varepsilon \text{ (适当小的数)}. \quad (5)$$

2.2 特征参数辨识实现步骤

根据图 1(a)所示的超级电容器等效电路模型, 选择电流 $I(t)$ 作为系统的输入, 电压 $U(t)$ 作为系统的输出。在超级电容器充放电过程中可实时同步采集得到 N 个输入值 $i(1), i(2), \dots, i(N)$ 和 N 个输出值 $u(1), u(2), \dots, u(N)$ 。特征参数辨识的具体步骤如下:

步骤 1. 求解超级电容器模型的传递函数。根据超级电容器的等效电路模型, 求出其传递函数为

$$G(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{RCs+1}{Cs} \quad (6)$$

式(6)中, $U(s)$ 和 $I(s)$ 是输出电压和输入电流的拉氏变换。

步骤 2. 对连续传递函数进行离散化。由于最小二乘法的模型结构为差分方程的形式, 因此需要对超级电容的连续模型进行离散化处理。文中采用特性较好的双线性变换(见式(7))进行处理, 离散化后得到的脉冲传递函数见式(8)。

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)}; \quad (7)$$

$$G(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = \frac{(2RC+T)z-2RC+T}{2Cz-2C} \quad (8)$$

式(7)、(8)中, T 是采样周期。

步骤 3. 求解差分方程。根据式(8)进一步可以得到系统的差分方程, 将其列写成最小二乘法的辨识模型为

$$u(z) = u(z-1) + (R + \frac{T}{2C})i(z) + (-\frac{T}{2C} - R)i(z-1). \quad (9)$$

根据前述辨识算法结构可知, 待辨识参数为: $\theta = [1 \ a_1 \ a_2]^T$ 。其中, $a_1 = R + T/(2C)$, $a_2 = T/(2C) - R$ 。

步骤 4. 采用递推最小二乘算法辨识模型参数。采用递推算法可以辨识出参数 a_1 和 a_2 的值, 进一步根据 a_1 和 a_2 的值即可反解出超级电容器的特征参数 R 和 C 。

2.3 实验验证

验证实验分别采用恒流充电实验和变电流充电实验。实验过程中采用 NI 同步数据采集卡实时

同步采集超级电容器充电电流和端电压信号, 采样周期为 1 s, 实验环境温度为 20 °C。实验对象标称等效串联内阻值为 0.5 mΩ, 等效电容值为 80 000 F。恒流充电实验电流等级为 150 A, 变电流充电实验最大充电电流为 80 A。恒流充电实验和变电流充电实验的电压和电流波形分别见图 2、3。

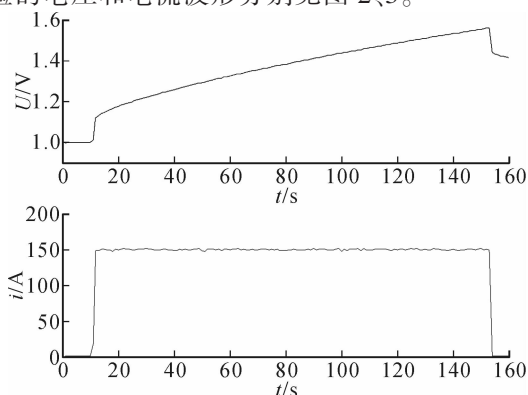


图 2 恒流充电实验波形

Fig. 2 Experiment waveforms of constant current charging

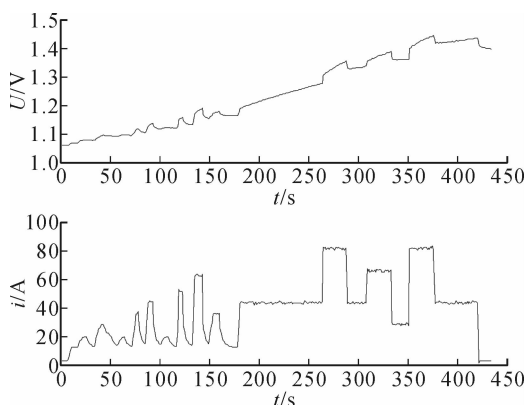


图 3 变电流充电实验波形

Fig. 3 Experiment waveforms of variable current charging

根据上述实验测得的充电电流和端电压数据, 利用递推最小二乘法进行辨识可得特征参数的辨识结果见表 1。

表 1 特征参数辨识结果

Table 1 Results of characteristic parameters identification

参数	恒流 150 A 充电	变电流充电
$\hat{\theta}$	$\begin{bmatrix} 0.9975 \\ 0.000817 \\ -0.00079 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9962 \\ 0.000719 \\ -0.000679 \end{bmatrix}$
ESR/mΩ	0.803	0.699
C/F	36 611	25 225

根据表 1 中辨识得到的 R 和 C , 利用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真分析, 以此验证特征参数辨识结果的正确性。由于 Simulink 中仿真对象没有单独的 RC 分支, 仅有 RLC 分支, 而文中研究的超级电容器等效电路中没有电感 L , 因此将 RLC 分支中

的 L 赋值为 0。此外,利用一个 DC 电压源来等效超级电容的初始工作电压。完整的 Simulink 仿真电路模型见图 4。

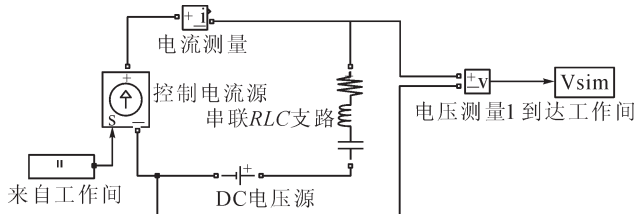


图 4 超级电容器等效电路仿真模型

Fig. 4 Equivalent circuit simulation model of supercapacitor

恒流充电实验和变电流充电实验的仿真结果与实测电压的对比图分别见图 5、6。

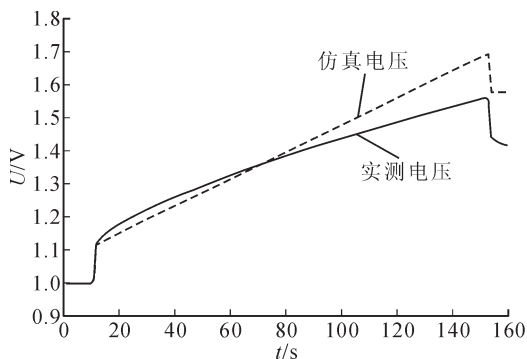


图 5 恒流充电仿真端电压曲线与实测端电压曲线对比

Fig. 5 Comparison of real and simulation terminal voltage of constant current charging

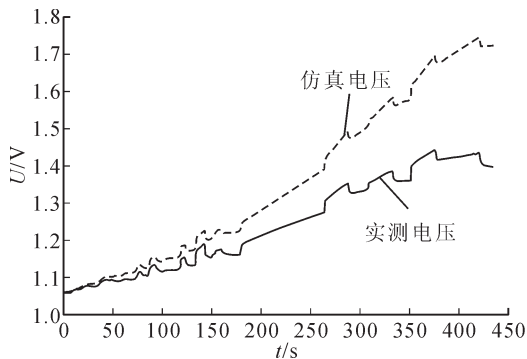


图 6 变电流充电仿真端电压曲线与实际端电压曲线对比

Fig. 6 Comparison of real and simulation terminal voltage of variable current charging

对比两个实验的实测端电压和仿真端电压波形可知,模型仿真结果与超级电容器的真实电气特性存在很大的偏差,也即特征参数的辨识结果是不可信的。因此需要对上述的辨识算法进行分析并加以改进。

3 改进的最小二乘算法

由表 1 可看出:特征参数的估计值 $\hat{\theta}$ 的第 1 行元素,即 $u(z-1)$ 的系数分别为 0.997 5 和 0.996 2,而

实际上 $u(z-1)$ 的系数应该为 1,即辨识结果与其真实值之间有 10^{-3} 级的误差。超级电容器单体的端电压等级为 10^0 V 级,充电电流等级为 10^2 A 级。故由式 (9) 可以看出,为保证等式两边数量级相同,这一误差将导致辨识出的 $i(z)$ 和 $i(z-1)$ 的系数有 10^{-5} 级的误差,也即使特征参数电容 C 将会产生 10^5 级的误差,因此辨识得到的特征参数结果不准确,无法描述超级电容器的真实电气特性。针对此现象,文中提出了以下改进方法。令

$$y = \begin{bmatrix} u(2) \\ u(3) \\ \vdots \\ u(N) \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$y' = \begin{bmatrix} u(1) \\ u(2) \\ \vdots \\ u(N-1) \end{bmatrix}。 \quad (11)$$

式 (10)、(11) 中, $u(i), i=1 \cdots N$, 为端电压的采样值。则

$$\tilde{y} = y - y' = \begin{bmatrix} u(2) - u(1) \\ u(3) - u(2) \\ \vdots \\ u(N) - u(N-1) \end{bmatrix}。 \quad (12)$$

此时,辨识模型结构由式 (9) 变为

$$\tilde{y}(z) = (R + \frac{T}{2C})i(z) + (\frac{T}{2C} - R)i(z-1)。 \quad (13)$$

即待辨识参数保留为真正需要辨识的两个参数,去掉了无需辨识的参数(常数“1”),即

$$\theta = \begin{bmatrix} R + \frac{T}{2C} \\ \frac{T}{2C} - R \end{bmatrix}。 \quad (14)$$

4 实验与仿真结果对比分析

同样利用前述的恒流充电和变电流充电实验数据,对新的辨识模型结构重新采用递推最小二乘算法进行超级电容器特征参数估计,所得结果见表 2。

根据表 2 中改进后的特征参数辨识结果,再次利用 Simulink 模型进行仿真,对比结果见图 7、8。

根据图 7、8 的对比结果可以看出,采用改进后的递推最小二乘法辨识出的特征参数值更加准确,模型仿真精度也大为提高。

5 结论

文中针对超级电容器特征参数辨识问题进行研究,通过推导超级电容器等效电路模型的最小二

表 2 特征参数辨识结果对比

Table 2 Comparison of characteristic parameters identification

参数	恒流充电实验		变电流充电实验	
	改进前	改进后	改进前	改进后
$\hat{\theta}$	$\begin{bmatrix} 0.997\ 5 \\ 0.000\ 817 \\ -0.000\ 79 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.000\ 819 \\ -0.000\ 798 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.996\ 2 \\ 0.000\ 719 \\ -0.000\ 679 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.000\ 716 \\ -0.000\ 694 \end{bmatrix}$
ESR/ mΩ	0.803	0.809	0.699	0.705
C/F	36 611	47 854	25 225	44 585

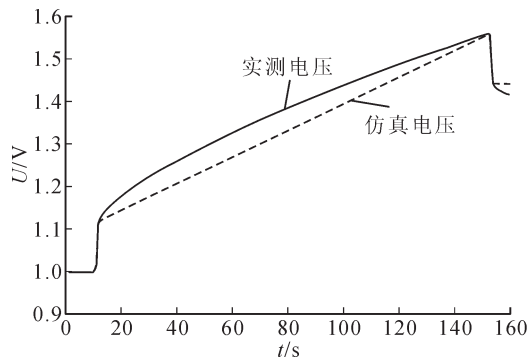


图 7 改进后恒流充电仿真端电压曲线与实测端电压曲线对比

Fig. 7 Comparison of real and simulation terminal voltage of constant current charging after improvement

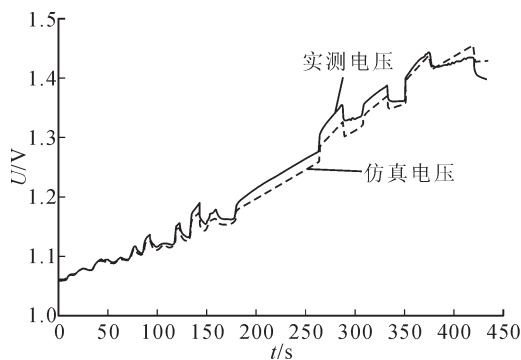


图 8 改进后变电流充电仿真端电压曲线与实测端电压曲线对比

Fig. 8 Comparison of real and simulation terminal voltage of variable current charging after improvement

乘辨识结构,发现采用传统最小二乘法辨识出的特征参数不能准确描述超级电容器的真实电气特性,需要对算法进行改进。基于文中改进的方法、实验与仿真结果可以得出以下结论:

1)提出的改进最小二乘法避免了在超级电容器特征参数辨识过程中将常数项系数也作为一个待辨识参数的不合理之处,减小了参数辨识误差,提高了参数辨识结果的可信度,仿真结果更加准确、并较好地描述了超级电容器的电气特性;

2)文中采用的超级电容器等效电路模型实质上为一个一阶模型,因此模型的仿真结果与超级电容器真实的电气外特性存在偏差,模型仿真精度与更高阶次的模型相比较低。但是该模型参数具有物理意义清晰、易于进行寿命预测与分析等优点,且模型简单、算法易于实现,对于需要在线辨识超级电容器特征参数的应用场合具有非常好的应用和推广价值。

参考文献:

- [1] EVANS A, STREZOV V, EVANS T J. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 4141-4147.
- [2] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [3] 冯晓, 张建成. 超级电容器及其在光伏发电系统中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(3): 49-52.
FENG Xiao, ZHANG Jiancheng. Ultra capacitor and its application study in distributed PV systems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(3): 49-52.
- [4] 闫新育, 刘水平, 董海健. 超级电容器组电压均衡技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(3): 62-67.
YAN Xinyu, LIU Shuiping, DONG Haijian. Study on voltage equalization of super-capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(3): 62-67.
- [5] SHARMA P, BHATTI T S. A review on electrochemical double-layer capacitors[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2901-2912.
- [6] HADJIPASCHALIS I, POULLIKKAS A, EFTHIMIOU V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6/7): 1513-1522.
- [7] AKINYELE D O, RAYUDU R K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014(8): 74-91.
- [8] 侯世英, 房勇, 曾建兴, 等. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 26-31.
HOU Shiyong, FANG Yong, ZENG Jianxing, et al. Application of supercapacitors to improve wind power system's low voltage ride through capability[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(5): 26-31.
- [9] 陈宇. 独立光伏系统中超级电容器储能研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 74-76.

- CHEN Yu. Research on a stand-alone PV system with ultracapacitor as energy storage device[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2011, 27(8): 74-76.
- [10] RUFER A, HOTELLIER D, BARRADE P. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 629-636.
- [11] 姜季宏, 刘鸿鹏, 江振洲, 等. 储能电梯中超级电容选取和控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 610-615.
- JIANG Jihong, LIU Hongpeng, JIANG Zhenzhou, et al. Supercapacitor selection and control strategy of energy storage elevator[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(4): 610-615.
- [12] TEYMOURFAR R, ASAEI B, IMAN-EINI H, et al. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line[J]. Energy Conversion and Management, 2012(56): 206-214.
- [13] 邓欢欢, 张丹丹. 串联超级电容器组开关电感通断法均衡研究[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 64-68.
- DENG Huanhuan, ZHANG Dandan. Study on series supercapacitor group switching inductive method balancing test[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 64-68.
- [14] 孙家南, 赵洋, 韦莉, 等. 基于系统辨识的电化学超级电容器建模[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 16-21.
- SUN Jianan, ZHAO Yang, WEI Li, et al. Modeling of electrochemical supercapacitor based on system identification[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 16-21.
- [15] BULLER S, KARDEN E, KOK D, et al. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1622-1626.
- [16] KIM S, CHOI W. A method for performance evaluation and optimal sizing of the supercapacitor module by the electrochemical impedance spectroscopy[C]//31st International Telecommunications Energy Conference. Incheon, Korea: [s.n.], 2009: 1-6.
- [17] TIRONI E, MUSOLINO V. Supercapacitor characterization in power electronic applications: proposal of a new model[C]//2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy: [s.n.], 2009: 367-373.
- [18] DU Lingling. Study on supercapacitor equivalent circuit model for power electronics applications[C]//2009 2nd Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Shenzhen, China: [s.n.], 2009: 51-54.
- [19] 赵洋, 张逸成, 孙家南, 等. 混合型水系超级电容器建模及其参数辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 186-191.
- ZHAO Yang, ZHANG Yicheng, SUN Jianan, et al. Modeling of hybrid supercapacitor with aqueous electrolyte and its parameter identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 186-191.
- [20] SPYKER R L, NELMS R M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 829-836.
- [21] TECHNOLOGIES M. BOOSTCAP energy storage modules life duration estimation[S]. America: Maxwell Technologies, 2007.
- [22] 萧德云. 系统辨识理论及应用[M]. 清华大学出版社, 2014.
- XIAO Deyun. Theory of system identification with applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- 赵洋(1981—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为新能源发电技术与应用、超级电容储能系统性能分析、系统辨识与智能优化算法。

(上接第198页)

- [20] 尚华, 王惠荣. 太阳能光伏发电效率的影响因素[J]. 宁夏电力, 2010(5): 48-50.
- SHANG Hua, WANG Huirong. Analysis on the factors affecting the efficiency of solar energy photovoltaic power Generation[J]. Ningxia Electric Power, 2010(5): 48-50.
- [21] 林振智, 文福拴, 周浩. 熵权决策理论及其在黑启动决策中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 26-33.
- LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, ZHOU Hao. Entropy weight based decision-making theory and its application to black-start decision-making[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 26-33.
- [22] 杨锡运, 刘欢, 张彬, 等. 基于熵权法的光伏输出功率组合预测模型[J]. 太阳能学报, 2014, 35(5): 744-749.
- YANG Xiyun, LIU Huan, ZHANG Bin, et al. A combination method for photovoltaic power forecasting based on entropy weight method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(5): 744-749.
- [23] 姜启源. 层次分析法中的若干问题[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(23): 156-168.
- JIANG Qiyuan. Some issues on analytic hierarchy process[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(23): 156-168.
- 马春艳(1980—), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及其自动化、电力系统可靠性分析。
- 刘惠康(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制、电力系统保护与控制等。
- 龚瑛(1981—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及其自动化。