

DOI: 10.7667/PSPC151291

大风电机组变桨用超级电容模组健康状态在线监测方法研究

石建^{1,2}, 周腊吾¹, 葛召炎¹, 陈浩²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南世优电气股份有限公司, 湖南 湘潭 411133)

摘要: 随着风电机组安全运行问题日益受到重视, 风电机组变桨用超级电容模组的可靠性变的越来越重要。为了实时监测超级电容模组健康状态保证模组可靠性, 提出了一种在线监测模组健康状态的方法。该方法在主控系统中编程测量在开路电压法与电流积分法两种测量方法下风电机组掉电低电压穿越和顺桨时超级电容模组放电电荷量, 然后根据两种方法估算的电荷量差值与模组失效阈值之比判断其健康状态。实验结果表明, 通过上述方法主控系统能实时监测到超级电容模组健康状态, 特别是当超级电容老化失效发生时, 可进行实时报警。该方法有效地实时监测了风电机组变桨用超级电容模组健康状态, 从而极大地提高了风电机组安全运行的可靠性。

关键词: 风电机组变桨距系统; 超级电容模组; 健康状态; 老化失效; 在线监测

Online monitoring method of health state of ultracapacitor for wind turbine pitching

SHI Jian^{1,2}, ZHOU Lawu¹, GE Zhaoyan¹, CHEN Hao²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Shiyou Electric Public Co., Ltd., Xiangtan 411133, China)

Abstract: With the safe operation of the whole wind turbine generator to be paid more attention, the reliability of the ultracapacitor modules for wind turbine pitching has become more and more important. For continuously monitoring to the health status of the ultracapacitor modules and ensuring the reliability, this paper presents an on-line monitoring method of the health state of the module. When wind turbines LVRT and feathering after power down, it can measure the electronic quantity that the ultracapacitor discharges respectively by open circuit voltage measurement methods and current integral measurement methods in the master system. The ratio of the difference of the calculated electronic quantity to the failure thresholds of the ultracapacitor module determines the health state of the ultracapacitor module. Experimental results show that the master-controlled system can monitor the ultracapacitor module health status by the above methods, particularly when the ultracapacitor aging failure occurs, this method can continuously effectively monitor the health status of the ultracapacitor for wind turbine pitching, thus improve the reliability of wind turbines for safe operation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207048).

Key words: wind turbine pitch system; ultracapacitor modules; health state; aging failure; online failure monitoring

0 引言

随着风电机组整个系统的安全运行问题日益受到重视, 作为实现风电机组低电压穿越^[1]和掉电安全顺桨两大重要功能的后备储能器件——超级电容模组^[2], 其可靠性成为安全问题先决条件与最关注的问题。

超级电容模组的高能量密度、长寿命(常温下 10

年, 高于蓄电池)、极长的充放电循环寿(50~100 万次, 远高于蓄电池)、高能量密等优异性能而得到越来越多的应用, 特别是已成为风电机组变桨距系统后备储能器件的主流。然而, 在实际应用中可能会出现明显低于厂商手册数据给出的数据^[3]。特别是大规模储能应用中超级电容模组需要大量串并联组合工作^[4], 其老化受温度、偏置电压、单体参数不一致等诸多因素影响, 往往经数月使用, 性能就已经下降^[3,5]; 同时若其中某节单体失效, 将迅速导致模块甚至全储能系统无法正常工作^[6]。由于风

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51207048)

电机组工作在酷热严寒等地方,作为变桨距系统后备储能器件——超级电容模组所处环境比较恶劣,结合系统安全运行高可靠性的使用需求,必须进行必要的状态监测。

1 超级电容模组容量估算

1.1 SOC 的定义

SOC^[7](State of Charge)是用来标称当前电容容量的状态参数,通过准确可靠的状态参数进行电容的管理与控制,从而能够安全可靠地使用电容模组^[8-9]。目前对 SOC 定义^[3,10]存在众多形式,从电荷量的角度定义,其经典的 SOC 定义可用下式表示。

$$SOC = \frac{Q}{C} \quad (1)$$

式中: C 表示超级电容当前温度下额定电压处总电荷量; Q 表示超级电容的剩余电荷量。

1.2 常见的 SOC 估算方法

超级电容模组 SOC 测量是容量在线监测的关键技术,经过多年的研究,目前已经有多种估计 SOC 的方法,主要包括:开路电压法(OCV)^[11]、内阻法^[12]、电流积分法、线性模型法、卡尔曼滤波法^[8]等。这些算法是随着能量监控系统技术不断的发展而相继出现的。每种算法都有其优缺点,对比见表 1。

表 1 几种主要 SOC 算法对比分析^[8]

Table 1 Comparative and analysis of the algorithms about estimating SOC

| SOC 估算方法 | 优点 | 缺点 | 适合场所 |
|----------|-----------------------|---------------|-------------|
| 开路电压法 | 简单易行,精度较高 | 电容虚高、温度影响 | 适合直接对电容的测量 |
| 电流积分法 | 实时计算通过的电荷量 | 电流测量精度导致累计误差 | 可用于较稳定的电流输出 |
| 内阻法 | 在电容放电后期,具有较好的精度和适应性 | 电容模组内阻的测量比较困难 | 适用于放电后期 |
| 卡尔曼滤波法 | 获得较高准确的 SOC,并且能计算估算误差 | 要求样本多 | 适合精度要求高场所 |

在以上方法中,开路电压法易于实现,没有长时间的积累误差,但是受温度影响较大。超级电容模组可等效于理想电容^[9],电压大小随储存电荷量变化,不像电池一样有“平台区”^[13]。根据这一特点,本文采用了基于开路电压法对超级电容模组 SOC 值进行估计,因为其受温度影响较大,必须对其进行相应修正。

1.3 开路电压法估算模组容量^[8]

对变桨距系统后备电源柜——超级电容模组

在 100~450 V 中,每隔 10 V 做恒流放电实验,开路电压与额定电压比值和对应 SOC 关系如图 1。

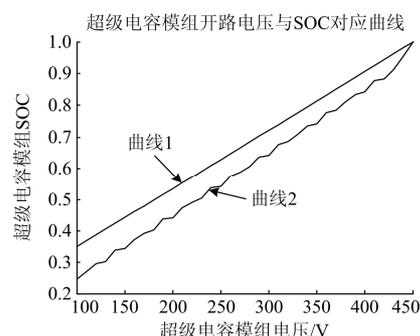


图 1 超级电容开路电压与 SOC 对应曲线

Fig. 1 Relationship curve about the ultracapacitor open-circuit voltage and the SOC

图 1 中曲线 1 为理想状态开路电压与额定电压比值曲线,曲线 2 为通过实验测定开路电压与超级电容模组 SOC 对应关系曲线。可以看出恒流充放电时,超级电容模组开路电压变化和存储电荷量变化趋势一致,这为利用开路电压估计超级电容模组 SOC 提供了理论基础和实验依据。

但由实验结果可知,超级电容开路电压比值与超级电容模组 SOC 并非严格对应,在超级电容额定电压附近,其开路电压比值与超级电容模组 SOC 差距比较小。由于误差的存在,对开路电压进行修正,其电压修正因子为 a, b ,采用最小二乘法对开路电压比值与 SOC 曲线进行二次拟合^[8],则超级电容模组 SOC 与开路电压对应关系为式(2)所示。

$$SOC = a \times \left(\frac{U_o}{U_N}\right)^2 + b \times \left(\frac{U_o}{U_N}\right) \quad (2)$$

式中: U_N 为模组额定电压; U_o 为模组实时电压; a 和 b 是常量,通过拟合,得到 $a=0.012$, $b=0.989$ 。

图 2 中曲线 2 即为二次拟合曲线,后备电容柜超级电容模组 SOC 拟合曲线如图 2。

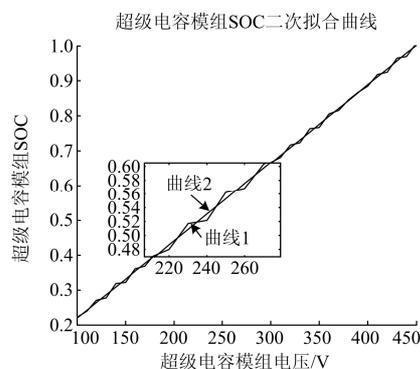


图 2 超级电容模组 SOC 二次拟合曲线

Fig. 2 Quadratic fitting curve of the ultracapacitor modules SOC

规定超级电容模组在额定电压、常温25℃下, 模组SOC为1时, 其额定电荷量^[8]为 C_N , C_N 的确定需对待测超级电容模组进行首次充放电实验计算求得。

风电机组变桨距系统运行时, 实时测量超级电容模组放电干路直流母线开路电压 U_i , 根据开路电压法, 超级电容模组电荷容量估算如式(3)所示。

$$Q_i = C_N \times SOC_i = C_N \times (a \times (\frac{U_i}{U_N})^2 + b \times (\frac{U_i}{U_N})) \quad (3)$$

式中, Q_i 表示超级电容模组电荷容量。

1.4 模组容量修正

温度影响超级电容模组额定电荷量大小。这是由于温度降低时, 电解液的粘度增加, 渗入极板内部困难, 同时电阻增大, 电容端电压降低, 从而容量减小, 导致不同温度下超级电容模组的容量不同, 因此不同温度下SOC=1时对应的具体容量也不同^[8,14]。为保证对超级电容容量的准备估值, 进行必要的温度补偿, 以室温(25℃)条件下超级电容模组的容量为基准^[14], 对其他温度情况下容量进行建模。

常用的描述温度影响的模型为

$$C(T/^\circ\text{C}) = C_N \cdot [1 + \sigma \cdot (T - 25)] \quad (4)$$

式中: $C(T/^\circ\text{C})$ 是电容在温度为 $(T/^\circ\text{C})$ 时的额定容量; C_N 是超级电容在25℃时的额定容量; σ 为温度系数, 不同温度的区间, σ 值不同。

修正后超级电容模组容量估算可用式(5)表达。

$$Q_i = C(T/^\circ\text{C}) \times SOC \quad (5)$$

2 模组健康状态在线监测原理及方案

2.1 超级电容器老化失效分析

对于超级电容模组由电极、电解液、隔膜、集流体等部分组成, 其失效一般由超级电容模组本身老化引起, 其老化从物理与化学性质上改变电极、电解液与其他超级电容模组部件, 如氧化还原反应中碳电极热力学非稳定, 从而借由等效容值与等效串联电阻等特征参数, 量化因超级电容模组老化引起的一系列不可逆的性能衰减^[6,15]。

实验证明在超级电容充放电循环测试中, 其电容内阻ESR会随着超级电容充放电次数增加而增加。但超级电容容量则明显减小, 超级电容性能明显降低^[15], 与电池中电压虚高现象类似。

在对超级电容模组失效判定根据超级电容本身特性下降判定, 或是寿命终结判据。然而前者直接测量较困难。一般根据电容器寿命经典失效判据^[16]: 超级电容模组串联电阻(Equivalent series

resistance, ESR)加倍或容量下降达20%作为寿命终结判据。

2.2 监测方案

根据上文超级电容模组失效分析, 本文在主控PLC中编程采用开路电压法与电流积分法分别实时监测风电机组掉电低电压穿越和顺桨时超级电容放电电荷量, 然后根据两种方法估算的电荷量差值和超级电容模组失效阈值比值判断超级电容模组的健康状态。

2.2.1 基于开路电压法估算模组放电电荷量

采用上节提到的开路电压法对超级电容模组电荷容量进行估算, 当正常运行风电机组突然掉电顺桨时, 根据实时采集到的超级电容模组开路电压 U_i 运用如式(6)来确定模组初始电荷量 Q_i :

$$Q_i = C(T_i/^\circ\text{C}) \times SOC_i = C(T_i/^\circ\text{C}) \times (a \times (\frac{U_i}{U_N})^2 + b \times (\frac{U_i}{U_N})) \quad (6)$$

式中, T_i 模组放电初始超级电容模组温度。其中引入温度补偿为 $C_i(T_i/^\circ\text{C}) = C_N \cdot [1 + \sigma \cdot (T_i - 25)]$

当超级电容模组掉电顺桨放电结束后, 实时采集超级电容模组放电干路直流母线的电压 U_t 。求得最终电荷量 Q_t :

$$Q_t = C_2(T_t/^\circ\text{C}) \times SOC_t = C_2(T_t/^\circ\text{C}) \times (a \times (\frac{U_t}{U_N})^2 + b \times (\frac{U_t}{U_N})) \quad (7)$$

式中, T_t 模组放电结束时超级电容模组温度。其中温度补偿为 $C_2(T_t/^\circ\text{C}) = C_N \cdot [1 + \sigma \cdot (T_t - 25)]$ 。

基于开路电压法估算超级电容模组放电电荷容量 Q_s 可用式(8)表达。

$$Q_s = Q_i - Q_t \quad (8)$$

2.2.2 基于电流积分法测量模组放电电荷量

按时计量法又称电流积分法^[8]的核心思想就是在一定的时间片 Δt 内, 对电容放电电流 I 进行采样, I 与 Δt 的乘积就是时间片 Δt 内的放电电荷量。如果将一定时间 t 分隔成很多个 Δt , 分别计算这些 Δt 与 I 的乘积就可以视为 t 内放出的电荷量。实时采集模组放电电压、电流及温度, 基于电流积分法估算风电机组掉电顺桨超级电容模组放电电荷量 Q_d 如式(9)所示。

$$Q_d = \sum i \times \Delta t = \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (9)$$

2.2.3 模组健康状态判定

根据电容器寿命经典失效判据^[16]: 超级电容模组ESR加倍或容量下降达20%。但针对风电机组变桨距用超级电容模组, 本文以风电机组主动力电源

断电后满足风机低电压穿越和顺桨最低容量的 1.4 倍确定模组寿命终结依据,即以电容模组电荷容量下降达 30%触发寿命终结信号。

本文采用容量下降达30%作为超级电容模组失效判据,如式(10)所示。

$$E = 0.3C(T/^\circ\text{C}) \times (1 - \text{SOC})$$

$$\text{PHM} = \frac{Q_s - Q_d}{E} \leq 1 \quad (10)$$

式中: T 为模组初始温度; PHM 表示超级电容模组健康状态受损程度。

当用开路电压法估算超级电容模组在掉电低穿和顺桨中电荷量 Q_s 与在超级电容放电直流母线中的电流积分法估算的电荷量 Q_d 相减得到模组电荷量差值。电荷量差值和模组失效阈值比值越小则模组电容健康状态越好。如果 PHM 大于等于 1, 则说明超级电容模组寿命即将或已失效。

3 模组健康状态在线监测程序设计

根据上节监测方案,因为模组参数监测在变桨距系统设计时已考虑,不需额外增加数据采集硬件,在风电机组主控 PLC 中编写变桨距系统超级电容模组状态监测程序,实时监测模组的健康状态,保证风电机组可靠性。超级电容模组健康状态监测和失效判定流程如图 3。

从图 3 可知,超级电容失效判定流程为在初次顺桨时先确定待测超级电容额定 C_N ,再根据开路电压法和电流积分法分别测量在同一时间内超级电容放电电荷量,最后根据两者差值是否超出模组失效阈值判断超级电容模组是否失效。

4 测试分析

验证上述设计方案的有效性,本文利用变桨距电机对拖测试平台对超级电容模组进行仿真测试^[17]。本次实验对象采用湖南世优电气生产的后备电容柜,本电容柜由5组90 V、9.6 F超级电容模组串联,额定电压为450 V。变桨电机的额定功率为8 kW,为满足顺桨5°/s要求电机转速为1 600 rpm;负载电机的对拖力矩为30 Nm。

在实验平台上对整个变桨距系统进行为期三个月高频带载掉电顺桨测试,分别纪录该变桨距系统后备电容柜在主电源断电前后各柜模组电压、直流母线电流积分值、模组 SOC。后备电容柜 B 初次测试额定电荷量 C_N 为 855.5 C。超级电容柜 B 部分据见表 2。

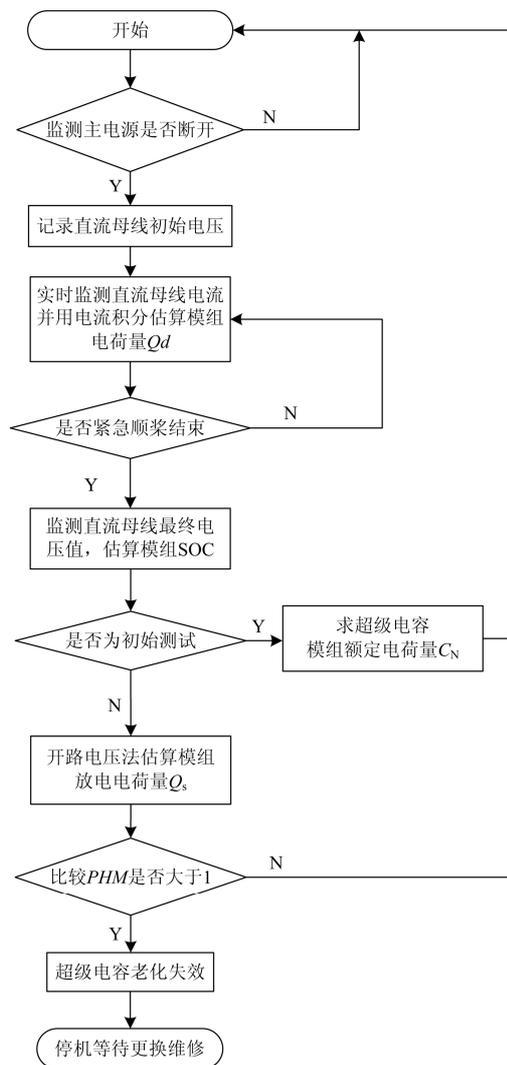


图 3 超级电容失效判定流程图

Fig. 3 Flow chart of ultracapacitor failure determination

表 2 超级电容模组状态记录表

Table 2 State data sheet of the ultracapacitor modules

| 实验时间 | 电容柜 | 温度/ (°C) | 初始 电压/ V | 终值 电压/ V | 开路 法/C | 积分 法/C | 健康受 损程度 |
|-----------|-----|-------------|----------------|----------------|-----------|-----------|------------|
| 2015-1-11 | B | 14 | 450 | 323 | 243 | 242 | 0.02 |
| 2015-1-30 | B | 8 | 450 | 315 | 257 | 248 | 0.15 |
| 2015-2-11 | B | 5 | 450 | 304 | 278 | 254 | 0.34 |
| 2015-2-27 | B | 4 | 450 | 293 | 299 | 260 | 0.53 |
| 2015-3-11 | B | 7 | 450 | 284 | 317 | 262 | 0.69 |
| 2015-3-22 | B | 10 | 450 | 275 | 335 | 265 | 0.80 |
| 2015-4-01 | B | 15 | 450 | 266 | 352 | 268 | 0.95 |
| 2015-4-10 | B | 17 | 450 | 263 | 365 | 272 | 1.01 |
| 2015-4-15 | B | 23 | 450 | 253 | 373 | 276 | 1.1 |

从表 2 中数据可以看出变桨距系统电容柜 B 中开路电压法与电流积分法估算的超级电容模组电荷容量之间差值 E 是不断增大的, 根据式(9)、式(10)对表 2 最后两组数据进行计算可知, 其健康受损程度 PHM 已经大于 1, 即超级电容模组所含电量已低于风电机组低电压穿越和顺桨最低容量的 1.4 倍。风电机组主控报出更换超级电容模组警告, 并及时进行更换处理。后备电容柜 B 超级电容模组健康状态严重受损后放电电压波形如图 4。



图 4 超级电容模组严重受损后放电电压波形

Fig. 4 Discharging voltage waveform after the ultracapacitor module broken down

图 4 中曲线为超级电容模组严重受损后放电电压波形图, 图中可以看出本次掉电带载顺桨试验中超级电容模组完成单次顺桨后模组电压跌落到 230 V 附近, 根据式(9)、式(10)和表 2 可推断出该超级电容模组已失效。

5 结论

本文通过在风电机组主控 PLC 中编写程序实时监测变桨距系统超级电容模组健康状态。在程序中, 基于开路电压法和电流积分法估算超级电容模组 SOC 的差值, 实时判断模组健康状态, 判断模组是否失效, 从而保证风电机组的可靠性。由于现有老化研究的准确性仍无法满足大规模储能领域日益增长的可靠性与安全性需求, 特别是风电领域。因此未来超级电容模组健康状态的研究仍将是相关领域的重要科研内容。

参考文献

[1] 邹和平, 于芑, 周玮, 等. 基于超级电容器储能的双馈风力发电机低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 48-52.

ZOU Heping, YU Peng, ZHOU Wei, et al. Study on the low voltage ride through of doubly fed wind generator based on the super-capacitor storage[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 48-52.

[2] 刘祎. 超级电容储能装置作为兆瓦级风力机变桨系统备用电源的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

LIU Wei. Investigation of ultracapacitor energy storage device as backup power of pitch control system for MW class wind turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[3] LAJNEF W, VINASSA J M, BRIAT O, et al. Quantification of ageing of ultracapacitors during cycling tests with current profile characteristics of hybrid and electric vehicles application[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(5): 683-689.

[4] 刘振宇, 马民, 马辉栋, 等. 阶梯式快速混合储能系统设计及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 69-75.

LIU Zhenyu, MA Min, MA Huidong, et al. Storage system and control strategy research of stepwise and fast storage energy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 69-75.

[5] EL BROUJI H, VINASSA J M, BRIAT O, et al. Ageing assessment of supercapacitors during calendar life and power cycling tests[C] // Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, USA: IEEE, 2009: 1791-1798.

[6] 顾帅, 韦莉, 张逸成, 等. 超级电容模组老化特征与寿命测试研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 145-153, 204.

GU Shuai, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Prospects of ageing characteristic and life test research on supercapacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 145-153, 204.

[7] 黄羚, 蔡涛, 陈天锦, 等. 基于 SOC 调整的光伏电站储能系统调控策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 66-70.

HUANG Ling, CAI Tao, CHEN Tianjin, et al. Control strategy of battery energy storage system for large-scale PV system based on SOC adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 66-70.

[8] 郝国亮. 超级电容荷电状态计算方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

HAO Guoliang. Research on super-capacitor state of charge calculation method[D]. Beijing: North China

- Electric Power University, 2012.
- [9] 艾贤策. 车用锂离子超级电容模组性能研究及管理系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
AI Xiance. Characterization research and management system design of the lithium-ion ultracapacitor for HEV[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [10] 王伟, 薛金花, 叶季蕾, 等. 基于 SOC 调控的用于抑制光伏波动的电池储能优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 75-80.
WANG Wei, XUE Jinhua, YE Jilei, et al. An optimization control design of battery energy storage based on SOC for leveling off the PV power fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 75-80.
- [11] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用[J]. 电池, 2004, 34(5): 376-378.
LIN Chengtao, WANG Junping, CHEN Quanshi. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application[J]. Battery Bimonthly, 2004, 34(5): 376-378.
- [12] 位俊雷. 用于电动汽车的超级电容模组组管理系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
WEI Junlei. Research on the super-capacitor stacks management system of the electric bus[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [13] 高飞, 杨凯, 惠东, 等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 41-45.
GAO Fei, YANG Kai, HUI Dong, et al. Cycle-life energy analysis of LiFePO₄batteries for energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 41-45.
- [14] 徐文兵. 超级电容能量监控系统的设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
XU Wenbing. Design and research on energy monitoring system for super capacitor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [15] CHAARI R, BRIAT O, DELÉTAGE J Y, et al. Ageing quantification of supercapacitors during power cycling using online and periodic characterization tests[C] // Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Chicago, USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [16] Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. DOE/NE-ID-11173. FreedomCAR ultracapacitor test manual[S]. Idaho: Bechtel BWXT Idaho LLC, 2004.
- [17] 范宏, 朱牧之, 沈冰, 等. 线路保护实时仿真自动测试平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 123-129.
FAN Hong, ZHU Muzhi, SHEN Bing, et al. Research on automatic testing system of line protection based on real time simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 123-129.

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-09-10

作者简介:

石建(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为检测技术与自动化装置; E-mail: 120631468@qq.com

周腊吾(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电机及其控制方向的研究。

(编辑 姜新丽)