

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.03.007

# 微电网混合储能系统研究

刘晗钰, 文定都

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对微电网中传统蓄电池储能系统循环寿命短、电压波动大、功率密度低等问题, 提出了一种由蓄电池和超级电容器构成的混合储能系统及其控制方法。充分利用两种储能元件的优势, 通过设计均压控制策略、功率控制、 $V/f$ 控制等手段, 实现了各蓄电池和超级电容器单体的均压控制; 最后建立 Matlab/Simulink 模型对系统进行仿真。结果表明, 该方法减缓了电网负载波动时蓄电池的电流波动, 减小了直流母线的电压波动, 验证了该方法的可行性。

**关键词:** 储能系统; 蓄电池; 超级电容器; 均压控制; 微电网

**中图分类号:** TM912

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2019)03-0041-05

**引文格式:** 刘晗钰, 文定都. 微电网混合储能系统研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(3): 41-45, 94.

## Research on Hybrid Energy Storage System in Micro-Grid

LIU Hanyu, WEN Dingdou

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of such flaws as short cycle life, high voltage fluctuation and low power density found in traditional battery energy storage system in micro-grid, a hybrid energy storage system, which is composed of battery and supercapacitor, as well as its control method, has thus been proposed. By making full use of the advantages of the two kinds of energy storage elements, a voltage equalization control of each battery and supercapacitor unit can be achieved with voltage equalization control, power control and  $V/f$  control strategies combined. Finally, the system is to be simulated by establishing a Matlab/Simulink model. The results show that the method helps to reduce the current fluctuation of storage battery and the voltage fluctuation of DC bus with the fluctuation of the load of power grid, thus verifying the feasibility of the adopted method.

**Keywords:** energy storage system; battery; super capacitor; voltage equalization control; micro-grid

### 1 研究背景

近年来, 随着大功率电力电子器件 (如绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)、门极可断晶体管 (gate-turn-off thyristor, GTO)、电

力晶体管 (giant transistor, GTR)、金属-氧化物半导体场效晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 等) 和控制技术 (如神经网络、专家系统、深度学习) 的高速发展, 智能电网进入全能建设阶段<sup>[1]</sup>。而储能系统作为微电网、

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ2100)

作者简介: 刘晗钰 (1993-), 女, 湖南岳阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统自动化,

E-mail: 184829466@qq.com

通信作者: 文定都 (1969-), 男, 湖南道县人, 湖南工业大学教授, 主要从事电力电子与电力传动方面的教学与研究,

E-mail: 125710811@qq.com

分布式电源、可再生能源电网、电动汽车等的重要环节,应为系统提供快速功率缓冲,吸收或者补充电能<sup>[2]</sup>。在微电网中,储能的应用可以为系统提供有功功率支撑以及无功功率补偿,达到稳定和平滑微电网电压波动的目的。

电能的储存存在多种形式,一般可归纳为能量型储能和功率型储能两大类。能量型储能以钠硫电池、锂电池、铅酸蓄电池为代表,具有能量传输较稳定、储存时间较长、能量密度较大等优点。功率型储能以超级电容、超导磁储能、飞轮储能、压缩空气储能等为代表,具有响应速度较快、循环寿命较长、功率密度较高等优点。但以储能而言,能量型储能存在单体电压低、功率型储能存在能量密度小和自放电率高等明显缺点<sup>[3]</sup>。

为提高储能系统性能,课题组吸取两种储能方式的优点,克服其缺陷,提出了采用能量型和功率型构成的混合储能控制方案。超级电容器依靠电能和磁能的转换在短时间内提供较大的瞬时电流<sup>[4]</sup>,具有较大的功率密度,弥补了蓄电池功率密度低的不足,可以有效减少蓄电池快速充放电的次数,延长其使用寿命<sup>[3-4]</sup>。已有研究表明,超级电容器能在大功率下满足系统的稳定运行,在负载功率突然波动时能稳定微电网母线电压<sup>[5-6]</sup>。混合储能系统具有响应速度快、循环寿命长、功率密度高、能量密度大、经济性好等优点。如何实现混合储能系统内部各储能系统之间过充电、过放电、功率分配等问题,已经成为智能电网领域的一个主要研究课题。本文旨在设计一种含有超级电容器与蓄电池的混合储能系统。

## 2 蓄电池储能模块与超级电容器储能模块的均压设计与均压控制

### 2.1 均压电路设计

传统均压方案主要靠电阻等元器件消耗电能来实现各蓄电池单体电压的平衡,存在能耗高、灵活性差、均压速度慢等缺点。许多学者提出通过控制电容、电感、变压器等器件,以与单体蓄电池的能量交换实现电压均衡。但采用大量电容作为中间器件会降低电路的可靠性,带来尖峰电流<sup>[7]</sup>。故本研究提出均压策略,通过控制开关管的开断控制相邻储能元件的能量交换,实现电压均衡。

本文研究以蓄电池组作为主要储能元件,图1a为其电路原理图;以超级电容器作为辅助储能,其电路图如图1b所示。当电网出现大的复杂波动时,发挥其反应速度快的特点,缓解蓄电池快速释放电能的

趋势,降低蓄电池的快速充放电次数,延长蓄电池使用寿命。图1中 $U_{B1}$ 、 $U_{B2}$ 分别为均压电路中各单体储能元件的电压; $K_1$ 、 $K_2$ 为均压控制比例。

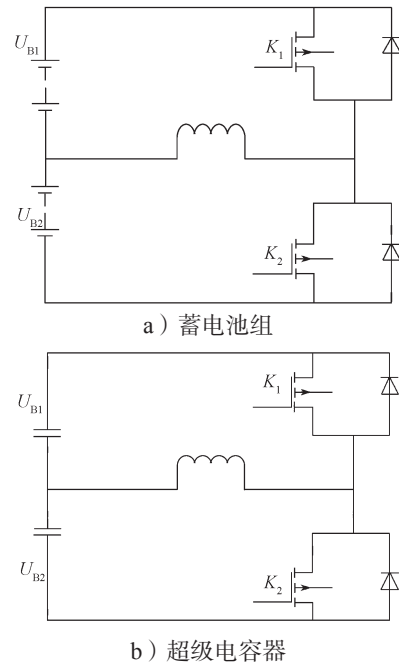


图1 均压拓扑结构

Fig. 1 Equalization topology

### 2.2 均压控制策略

本研究的蓄电池采用固定脉冲模式控制均压系统,其控制流程如图2所示,图中 $\delta U_1$ 为进行工作的门限电压。与主动式均压控制策略相比,固定脉冲控制的成本较低,稳定性较好,工程中易于实现。

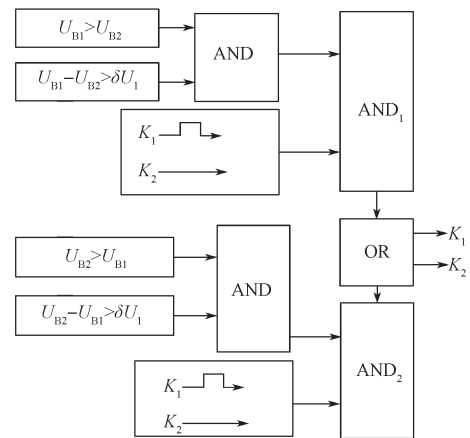


图2 均压控制逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of voltage equalization control

均压控制有两种工作情况,下面分别进行讨论。

**情况1**  $U_{B1} > U_{B2}$ , 且  $U_{B1} - U_{B2} > \delta U_1$  时, 图2中与门1输出高电位, 与门2输出低电位, 取或逻辑后  $K_1$ 、 $K_2$  驱动脉冲, 均压电路开始工作; 若  $U_{B1} - U_{B2} \leq \delta U_1$ , 两个与门输出与上述情况相反, 取或逻辑后, 输出仍为零, 均压电路不动作。

情况2  $U_{B2} > U_{B1}$ , 若  $U_{B2} - U_{B1} > \delta U_1$ , 图2中与门1输出低电位, 与门2输出高电位, 取或逻辑后  $K_1$ 、 $K_2$  驱动脉冲, 均压电路开始工作; 若  $U_{B2} - U_{B1} \leq \delta U_1$ , 两个与门输出与上述情况相反, 取或逻辑后, 输出仍为零, 均压电路不动作。

### 3 并网双向 DC/DC 变流器

双向 DC/DC 变流器, 是实现储能系统充放电的桥梁, 也是实现电能双向流动的硬件保障。目前主要采用三重化双向 DC/DC 变流器, 其主要优势如下:

- 1) 当变化功率较大时, 三重化双向 DC/DC 变流器由 6 个开关管组成, 具备更好的耐压和耐流能力。
- 2) 三重化双向 DC/DC 变流器可以减小变流器电流的纹波和谐波, 从而减小滤波器的安装体积。
- 3) 三重化 DC/DC 双向变流器的可靠性高。传统的 DC/DC 双向变流器仅由两个开关管组成, 当一个开关管故障时, 变流器就无法工作; 但三重化 DC/DC 变流器各单元间换流电路拥有能量互通功能, 一个开关管故障后, 其余变流单元可以继续工作。
- 4) 由于等效开关频率的提高, 变流器具备了更高的带宽, 系统动态性能得到改善。

超级电容具备吸收能量波动快速、电压范围宽等特点, 本研究采用三重化双向 DC/DC 变流器连接超级电容器阵列和直流电网, 其控制原理如图 3 所示, 结构如图 4 所示。

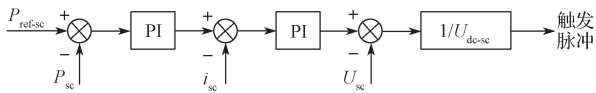


图 3 双向 DC/DC 变流器控制原理

Fig. 3 DC/DC bidirectional converter control principle

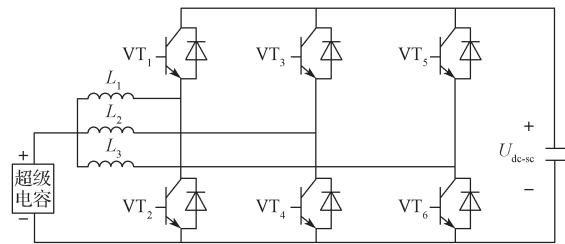


图 4 DC/DC 双向变流器结构图

Fig. 4 DC/DC bidirectional converter structure diagram

图 3~4 中,  $P_{ref-sc}$  为超级电容器储能的有功功率指令,  $U_{dc-sc}$  为直流母线电压;  $P_{sc}$ 、 $i_{sc}$ 、 $U_{sc}$  分别为超级电容器的有功功率、输出电流、输出电压。

### 4 混合储能系统控制策略

#### 4.1 P/Q 控制

当混合储能系统并网运行时, 参与系统的功率平

衡调节, 此时混合储能系统采用图 5 所示的 P/Q 控制, 实现系统的功率平衡和频率稳定<sup>[8-9]</sup>。P/Q 控制采用电网电压定向的 P/Q 解耦控制策略, 外环采用功率控制, 内环采用电流控制。通过 Park 变换, 将三相电压变换到旋转坐标系  $dq$  轴, 得到逆变器输出电压;  $\omega L i_d$ 、 $\omega L i_q$  为滤波器参数。

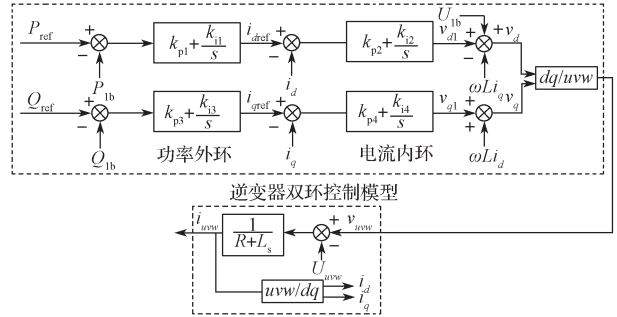


图 5 混合储能系统 P/Q 控制

Fig. 5 P/Q control of hybrid energy storage system

图 5 中,  $Q_{ref}$ 、 $P_{ref}$ 、 $U_{uvw}$  分别为超级电容器储能的无功功率指令、有功功率指令、输出电压;  $P_{lb}$ 、 $Q_{lb}$  为超级电容器的有功功率和无功功率;  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  分别为超级电容器经功率外环送入电流内环的直轴电流和交轴电流参考值;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为直轴和交轴电流;  $v_{d1}$ 、 $v_{q1}$  分别为从电流内环输出的直轴和交轴电压参考值;  $v_d$ 、 $v_q$  为超级电容器输出的直轴和交轴电压。

#### 4.2 V/f 控制

当微电网离网运行时, 无法获得外界电网电能的参考电压和频率, 混合储能系统作为主控微源, 需要为系统提供稳定的电压和频率支撑<sup>[10-11]</sup>, 此时并网双向变流器采取 V/f 控制。

V/f 控制是指逆变器输出稳定的电压和频率, 为离网运行中其他从属 DG 和敏感负荷提供稳定的电压和频率支撑, 确保他们的正常工作。图 6 是 V/f 控制的原理图, 采用电压外环和电流内环, 其解耦方式和控制与 P/Q 控制相似。

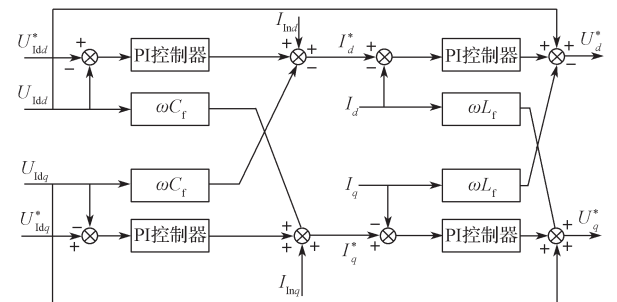


图 6 混合储能系统 V/f 控制

Fig. 6 V/f control of hybrid energy storage system

图中  $U_{ldd}^*$ 、 $U_{ldq}^*$  为参考电压;  $U_{ldd}$ 、 $U_{ldq}$  为实测电压;  $I_{ind}$ 、 $I_{inq}$  为实测直轴和交轴电流;  $I_d^*$ 、 $I_q^*$  为电压

外环输出的电流参考值； $\omega C_f$ 、 $\omega L_f$ 为滤波器参数。

$V/f$ 控制策略采用电流内环和电压外环的双闭环控制策略，利用实际电压与输出电压的参考值作比较，调节交流侧电压，确保输出电压稳定。电流内环构成电流随动系统，使得系统面对负荷变化能更快地恢复稳定。在此控制策略下，控制器能充分利用系统的状态信息，具备良好的动态性能和稳态精度。同时，电流内环增大了逆变器控制系统的带宽，使系统具备快速抵抗非线性负载带来的高频扰动的能力，减小输出电压的谐波含量。

### 4.3 混合储能系统功率分配

混合储能系统典型结构如图7所示，储能阵列由上述储能单元并联组成，并通过DC/DC双向变流器与电网相连；DC/DC双向变流器主要由开关管组成<sup>[8-9]</sup>。

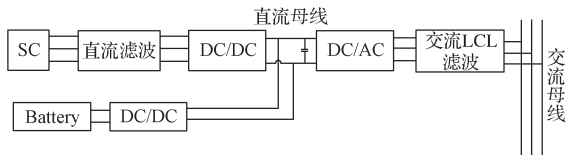


图7 混合储能系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of mixed energy storage system

针对蓄电池和超级电容器的特性，高通滤波器用于对混合系统功率 $P$ 进行滤波，将得到的高频分量作为超级电容器有功指令 $P_{\text{ref-sc}}$ ，并将剩余功率作为蓄电池有功指令 $P_{\text{ref-lb}}$ ，当 $P_{\text{ref-lb}} > 0$ 时，指定蓄电池放电，反之指定蓄电池充电。其数学关系式为

$$P = P_{\text{ref-lb}} + P_{\text{ref-sc}} \quad (1)$$

超级电容器和蓄电池的有功分量可以表示为

$$P_{\text{ref-sc}}(s) = \frac{sT_f}{1+sT_f} P(s), \quad (2)$$

$$P_{\text{ref-lb}}(s) = \frac{1}{1+sT_f} P(s). \quad (3)$$

式(2)(3)中： $s$ 为微分算子； $T_f$ 为高通滤波器滤波时间常数。设微分算子步长为 $\Delta T$ ，对式(2)(3)进行差分，可以得到：

$$P_{\text{ref-lb}}(k) = \frac{T_f}{\Delta T + T_f} [P_{\text{ref-sc}}(k-1) + P(k) - P(k-1)], \quad (4)$$

$$P_{\text{ref-sc}}(k) = \frac{T_f}{\Delta T + T_f} P_{\text{ref-lb}}(k-1) + \frac{\Delta T}{\Delta T + T_f} P(k). \quad (5)$$

由式(4)(5)可知，超级电容器的有功分量 $P_{\text{ref-sc}}$ 随 $P$ 变化而快速变化，而蓄电池的有功分量 $P_{\text{ref-lb}}$ 随 $P$ 变化缓慢，符合两种元件充放电特性。

## 5 仿真算例分析

### 5.1 系统仿真参数设定

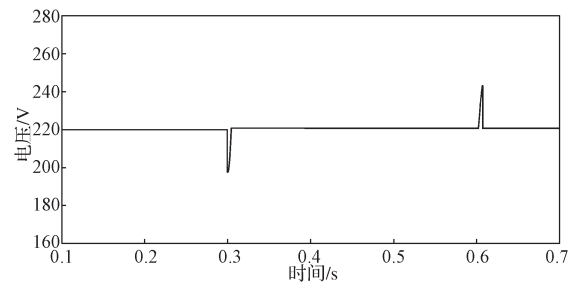
本研究使用Matlab/Simulink模块搭建混合储能

系统的仿真模型，设定蓄电池额定电压为96V，容量为100A·h；使用一阶线性RC等效模型等效超级电容器组，其容量设定为3.3F，初始电压为110V；给定系统最大功率为2000W，最小功率为100W；设定高通滤波器滤波时间初始值( $T_{f0}$ )为30，步长( $\Delta T$ )调整为1，调整宽度( $T_{fw}$ )为10。设定在0.3s处，系统负载由最小值变为最大值，在0.6s处，负载由最大值变为最小值。

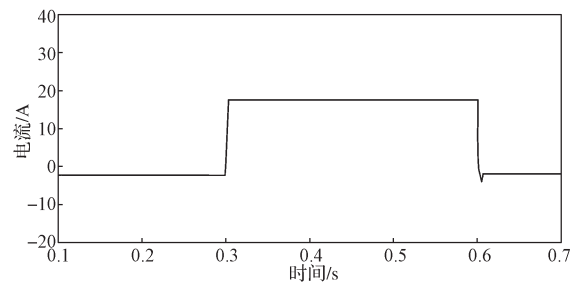
本研究使用超级电容器为蓄电池提供缓冲，依据高频滤波得到的高频分量进行充放电。

### 5.2 混合储能系统仿真结果分析

图8为系统在蓄电池单独工作时得到的直流母线电压和蓄电池电流波形。



a) 直流母线电压



b) 蓄电池电流

图8 蓄电池单独工作工况下负载突变时仿真结果图

Fig. 8 Simulation results of sudden load change of battery under single working condition

从图8a可知，负载变化后的一定时间内，系统直流母线电压回升至220V后保持稳定。由图8b可知，在0.3s时，当负载增大，蓄电池电流由-2.7A上升至17.6A，蓄电池由充电状态转变为放电状态，补充直流母线上的功率不足，这一过程中母线电压下降至196V；在0.6s时负载减小，蓄电池电流由17.6A下降至-3A后回到-2.7A，蓄电池进入充电状态，吸收母线上的溢出功率。在此过程中，母线电压升至243V，直流母线电压波动为 $\pm 24$ V左右。

图9为超级电容器和蓄电池构成的混合储能系统工作仿真波形图。对比图8b和图9b可知，加入超级电容器后，负载突变时，蓄电池的电流由蓄电池单独工作时陡升变为一个相对平缓的曲线，有效

缓解了蓄电池的充放电速度。由图 9b 和图 9c 可知, 在负载突变过程中, 当负载增加时, 蓄电池电流由负转正, 进入放电状态, 补充直流母线消耗的功率, 这一过程母线电压下降至 213 V; 在 0.6 s 时负载减小, 蓄电池电流由正转负, 蓄电池进入充电状态, 吸收母线上溢出功率, 在这一过程中母线电压上升至 227 V, 电压波动为  $\pm 7$  V 左右。对比图 9c 和图 8a 可得到直流母线电压波动由  $\pm 24$  V 减小为  $\pm 7$  V, 电能质量明显提升。

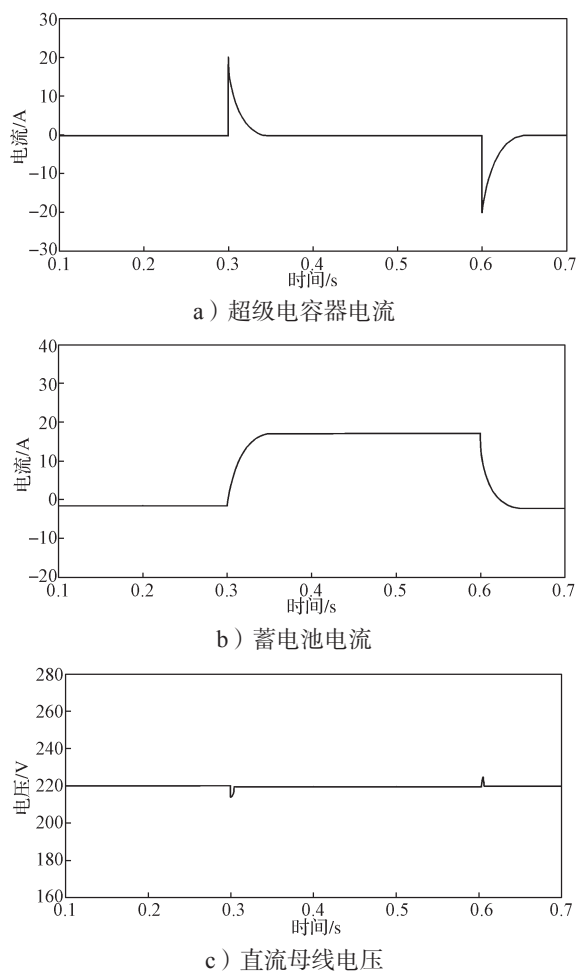


图 9 混合储能系统负载突变时的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of hybrid energy storage system with sudden load changes

## 6 结语

使用超级电容器为功率负载提供高频功率分量, 缓冲蓄电池工作时的突变电流, 并减小直流母线的电压波动。结合两者的优点, 避免了单一蓄电池储能系统中在应对负载突变过程中的能量过快降低、循环寿命短、电压波动大等缺点, 在保证混合储能系统同时具备高能量密度和高功率密度要求, 进一步提高电能质量的同时提高了储能系统的经济效率和循环寿命。

## 参考文献:

- [1] 雷金勇, 谢俊, 甘德强, 等. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 29-36.  
LEI Jinyong, XIE Jun, GAN Deqiang, et al. Optimization of Distributed Energy System and Benefit Analysis of Energy Saving and Emission Reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 29-36.
- [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] 戴志兰, 叶玉凤, 秦晓飞. 串联超级电容器组的均压控制分析与研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 8-11.  
DAI Zhilan, YE Yufeng, QIN Xiaofei. Analysis and Research About Voltage Equalization Control of Series Supercapacitor[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(10): 8-11.
- [4] 郭亮, 贾彦, 康丽, 等. 一种蓄电池和超级电容器复合储能系统[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(2): 296-301.  
GUO Liang, JIA Yan, KANG Li, et al. The Composite Storage System Using Lead Storage Battery and EDLC[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(2): 296-301.
- [5] 张继红, 郝昊达, 田玉, 等. 超级电容器储能的光伏系统自适应控制研究[J]. 自动化仪表, 2017, 38(7): 12-14, 19.  
ZHANG Jihong, HAO Haoda, TIAN Yu, et al. Research on Adaptive Control of PV System for Super Capacitor Energy Storage[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(7): 12-14, 19.
- [6] STUART T A, ZHU W. Fast Equalization for Large Lithium Ion Batteries[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 24(7): 27-31.
- [7] 高志刚, 姜奋林. 蓄电池储能系统的模块化均压拓扑研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1300-1307.  
GAO Zhigang, JIANG Fenlin. Research on a Modular Equalization Topology for Battery Storage System[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1300-1307.

(下转第 94 页)

Mechanical Processing of TRIP-Aided Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(7): 3232-3247.

[10] LEE C G, KIM S J, LEE T H, et al. Effects of Volume Fraction and Stability of Retained Austenite on Formability in a 0.1C-1.5Si-1.5Mn-0.5Cu TRIP-Aided Cold-Rolled Steel Sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 371(1/2): 16-23.

[11] RYU H B, SPEER J G, WISE J P. Effect of Thermomechanical Processing on the Retained Austenite Content in a Si-Mn Transformation-Induced-Plasticity Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(9): 2811-2816.

[12] JACQUES P J, GIRAULT E, HARLET P, et al. The Developments of Cold-Rolled TRIP-Assisted Multiphase Steels. Low Silicon TRIP-Assisted Multiphase Steels[J].

ISIJ International, 2001, 41(9): 1061-1067.

[13] TAMURA I. Strength of Steels[M]. Tokyo: Nikkan-Kogyo Shinbun, 1970: 40-41.

[14] TIMOKHINA I B, HODGSON P D, PERELOMA E V. Effect of Deformation Schedule on the Microstructure and Mechanical Properties of a Thermomechanically Processed C-Mn-Si Transformation-Induced Plasticity Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34(8): 1599-1609.

[15] CHEN H C, ERA H, SHIMIZU M. Effect of Phosphorus on the Formation of Retained Austenite and Mechanical Properties in Si-Containing Low-Carbon Steel Sheet[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(3): 437-445.

(责任编辑: 申 剑)



(上接第 45 页)

[8] 吴 俊, 丁玉成, 丁冠西. 微网超级电容器储能系统的滑膜控制策略研究 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36(7): 26-28.  
WU Jun, DING Yucheng, DING Guangxi. Research on Sliding Mode Control Strategy for Micro Network Super Capacitor Energy Storage System[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(7): 26-28.

[9] 叶玉凤, 张会林, 张志宇, 等. 微电网中超级电容器储能系统的仿真研究 [J]. 电子测量技术, 2017, 40(7): 26-30.  
YE Yufeng, ZHANG Huilin, ZHANG Zhiyu, et al. Simulation Study on Super Capacitor Energy Storage System in Microgrid[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(7): 26-30.

[10] 冯兴田, 万满满, 韩立博, 等. 基于储能的双向 DC/DC 变换器电源系统控制策略 [J]. 电力电子技术,

2017, 51(7): 8-10, 19.  
FENG Xingtian, WAN Manman, HAN Libo, et al. Control Strategy for Bidirectional DC/DC Converter Source System Based on Energy Storage[J]. Power Electronics, 2017, 51(7): 8-10, 19.

[11] 李军徽, 蒋 莲, 李翠萍, 等. 用于超级电容器储能系统变流器的控制策略设计 [J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(4): 32-38.  
LI Junhui, JIANG Lian, LI Cuiping, et al. Control Strategy Designed for Converter of Super Capacitor Energy Storage System[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2017, 37(4): 32-38.

(责任编辑: 申 剑)