

Research of Fast Charging Control on Supper Capacitor in Electric Bicycle System*

Yunwei Zhao¹, Baina He²

¹Department of Electric Engineering, Shandong Industry Vocational College, Zibo

²College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo

Email: zhaoyun2090@sina.com, hbn770425@163.com

Received: Dec. 17th, 2012; revised: Jan. 9th, 2013; accepted: Jan. 17th, 2013

Abstract: Super capacitor is a novel storing energy element with large capacity. Aiming at the electric bicycle frequent charging and replacement battery, the paper adopts the super capacitor as the power source of the electric bicycle. First, the super capacitor charging control scheme is designed. The key is the hardware of charging control circuit, including the drive circuit, sampling isolation circuit and signal conditioning circuit design, etc. And then the software design of charge controller is designed, the paper adopts way of working of first constant current charging and then constant voltage charging. Finally, the simulation modeling of charging control system is designed, and the simulation results is detailed analyzed, which verify the rationality of the charging ways.

Keywords: Supercapacitor; Constant Current Charging Control; Constant Voltage Charging Control; Driver Circuit; Buffer Circuit

超级电容在电动自行车系统中快速充电控制的研究*

赵云伟¹, 何柏娜²

¹山东工业职业学院电气工程系, 淄博

²山东理工大学电气与电子工程学院, 淄博

Email: zhaoyun2090@sina.com, hbn770425@163.com

收稿日期: 2012年12月17日; 修回日期: 2013年1月9日; 录用日期: 2013年1月17日

摘要: 级电容是具有超大容量的新型储能元件, 本文针对电动自行车需频繁充电和更换蓄电池的情况, 采用超级电容作为电动自行车的动力源。首先对超级电容充电控制方案进行设计; 重点在于充电控制电路的硬件设计, 包括驱动电路、采样隔离电路以及信号调理等电路的设计。然后对充电控制器进行软件设计, 采用先恒流充电后恒压充电的工作方式。最后对充电控制系统进行建模仿真, 详细分析仿真结果, 验证充电方式的合理性。

关键词: 超级电容; 恒流充电控制; 恒压充电控制; 驱动电路; 隔离电路

1. 引言

近年来, 人类面临的是能源危机和环境污染的双重严峻挑战。在此背景下, 电动汽车的研究和开发成为了当前汽车技术领域的一个重要方向, 其中, 电动自行车因其环保、便捷以及轻巧等优异特性成为研究热点。电动自行车研究的首要难题是开发出一种高

效、清洁环保的动力电源^[1-4]。超级电容器作为近几十年来发展起来的新型高效蓄能装置, 因其具有高功率、长循环寿命、能够快速充放电及绿色环保等优异特性, 因而得到越来越广泛应用。超级电容器作为一种新型电源, 由于其特有的性能优势, 备受人们重视^[5-8], 它将取代当前电动自行车需频繁充电和更换蓄电池的状况。

*基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J12LN76)。

超级电容是电动自行车电源系统的重要组成部分，有效的控制超级电容的充放电过程至关重要。本文采用两阶段充电方式，首先采用恒流限压充电方式，控制充电电压，保证恒流输出；恒流充电结束后转入恒压浮充方式，直到超级电容充满电量为止。

2. 充电控制电路方案设计

充电控制器在工作过程中，其工作方式主要由充电控制器的输出电流和超级电容器组的端电压决定^[9,10]。超级电容器充电初始时刻，电容器两端的电压很小，充电电流较大，适合采用恒流充电控制方法；当超级电容器两端电压达到设定值时，再切换为恒压充电模式，此时充电电流基本为零。其充电控制框图如图 1 所示。

由图 1 可知控制系统的外围电路主要有驱动、隔离电路、电压和电流采样检测电路、信号调理电路、辅助电源等。本文采用电压型控制芯片 TL494 作为控制电路的核心部件，充电控制器采用 Buck 电路，故充电控制系统主要体现在对功率开关管 Q 的控制。

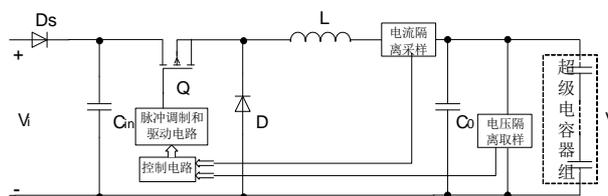


Figure 1. Charge controller block diagram
图 1. 充电控制器框图

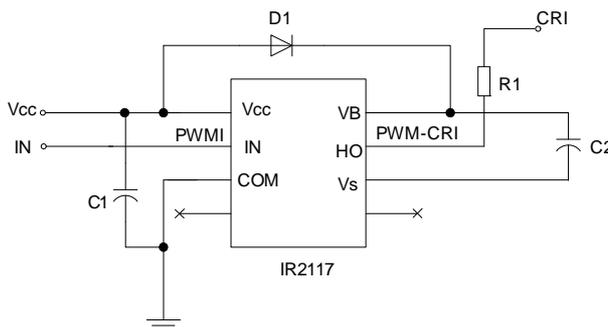


Figure 2. Charge controller driver circuit
图 2. 充电控制器驱动电路

3. 充电控制电路的硬件设计

3.1. 充电控制器驱动电路的设计

驱动电路作为控制电路与充电主电路的接口，将控制信号转化为主电路开关器件可接受的驱动信号，决定主电路能否正常工作。本文选用绝缘栅极晶体管 (IGBT) 作为主电路的开关器件，开断过程中需要驱动电路具有较强的驱动能力^[11]。

本文采用 IR2117 作为驱动芯片，兼有电磁隔离和光耦隔离的优点，开通关断延迟小、工作频率高。IR2117 的工作电压范围为 10~20 V，本文采用 15 V 供电。驱动电路设计如图 2 所示，其中 CRI 接 IGBT 的栅极。

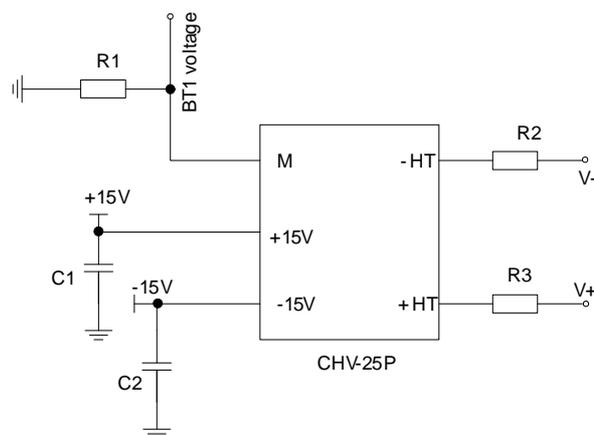


Figure 3. Voltage signal acquisition circuit
图 3. 电压信号采集电路

计算限流电阻值，若测量电压有效值范围为 1~300 V，则输入端的限流电阻为：

$$R_2 = \frac{V_N}{I_N} = \frac{300}{10} = 30 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

计算采样电阻值，输出端的额定电流为 25 mA，若输出最大得到 5 V，则采样电阻值为：

$$R_1 = \frac{V_m}{I_m} = \frac{5}{25} = 200 \Omega \quad (2)$$

2) 电流信号的采集

电流信号采集在小功率开关电源的情况下，一般

在电路中串联一个阻值很小的取样电阻，把取样电阻上的电压作为反馈信号，接入控制芯片中。由于本方案中充电电流较大，使用电阻采样会消耗较多功率，因此负载电流的采集通过霍尔电流传感器来实现，本文采用 LA-50P 型闭环霍尔传感器。电流传感器连接如图 4 所示。

本设计中电流传感器输入电流额定值为 50 A，测量范围为 0~±80 A，输出额定值为 50 mA 时对应的原边额定电流为 50 A，匝数比为 1:1000，电源电压采用 ±15 V，反应时间 < 1 us。

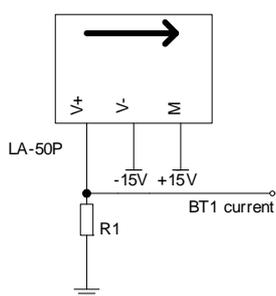


Figure 4. Current signal acquisition circuit
图 4. 电流信号采集电路

超级电容充电的电流比较大，按额定电流计算采样电阻值，则：

$$R_m = \frac{V_s}{I_m} = \frac{5}{50} = 100 \Omega \quad (3)$$

3.3. 隔离电源的设计

控制系统的驱动电路和霍尔传感器均需要 ±15 V 的电源，因此需设计辅助电源电路。本文采用二极管整流桥将交流 24 V 整流滤波后作为稳压器输入，然后经集成稳压管 L7815 和 L7915 稳压后分别产生 +15 V 和 -15 V 的电压，隔离电源电路如图 5 所示。

3.4. 信号调理电路设计

控制电路所用 TL494 芯片的 ADC 模块能接收的模拟信号为 0~3 V 的电压信号，因此，需要对输入 ADC 模块的传感器采集输出的信号进行调理，转换成 0~3 V 范围内的电压信号，再提供给控制电路进行分析处理^[12]。系统中信号调理电路的作用是滤波、幅值变换、信号转换等，调理电路如图 6 所示。

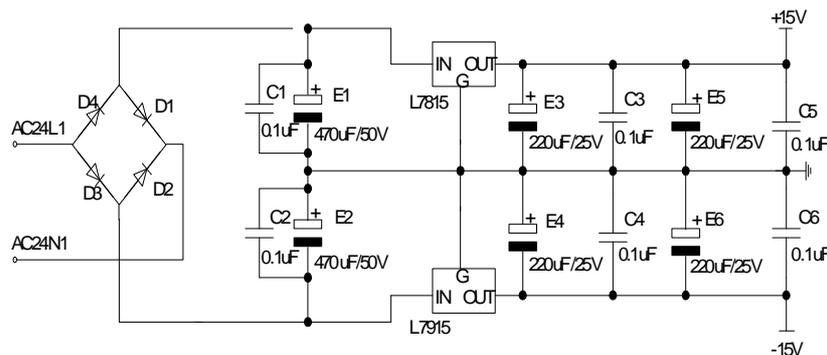


Figure 5. Isolation power supply circuit
图 5. 隔离电源电路

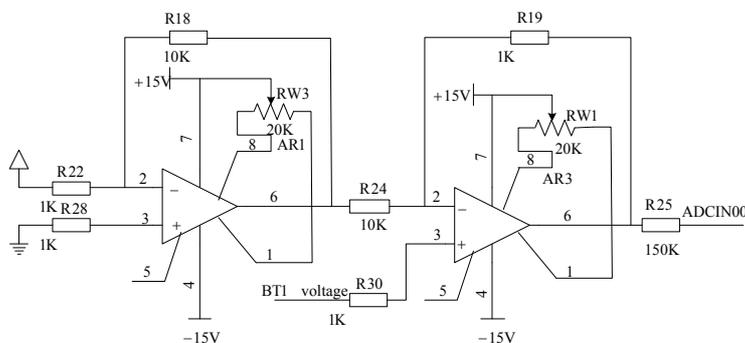


Figure 6. Signal processing circuit
图 6. 信号调理电路

图 6 中 ARI、R18、R22、R28 的作用是滤除直流采样回路中的噪声干扰，组成一阶低通滤波器；AR3、R19、R24、R30 组成电压跟随器，提高带负载的能力，减小输出阻抗并提高采样回路的输入阻抗；ADCIN00 接 ADC 模块的输入通道，BT1_voltage 端接传感器的输出端。

4. 充电控制电路的软件设计

根据超级电容器组端电压及系统要求，充电控制器采用先恒流充电后恒压充电的工作方式。本文控制电路采用 Buck 电路，将超级电容器组等效为一个理想电容器 C_{sc} 并联一个较大阻值电阻 R_{eq} 和串联一个较小阻值电阻 R_{es} 。超级电容充电时，如果没有电流环限制充电电流，超级电容就会处于短路状态，则充电电流比较大，从而损坏开关管。本文采用电感电流内环和电压外环的控制电路。

控制电路框图如图 7 所示，其中 K_v 为超级电容器组电压采样系数； K_i 为超级电容器组电感电流采样系数； $G_{f(s)}$ 为巴特沃斯滤波器的传递函数； $G_{v(s)}$ 为电压环控制器的传递函数； $G_{i(s)}$ 为电流环控制器的传递函数； $1/V_m$ 为 PWM 调节器的增益。

由图 7 可知，当超级电容电压较低时，电压环的输出 V_{ref} 处于饱和和限幅状态，此时超级电容以电压环输出 V_{ref} 的限幅值产生的 i_{ref} 作为电感电流的给定对超级电容进行恒流充电，当超级电容电压达到预定的充电电压后，电压环起作用，此时超级电容进行恒压充电。

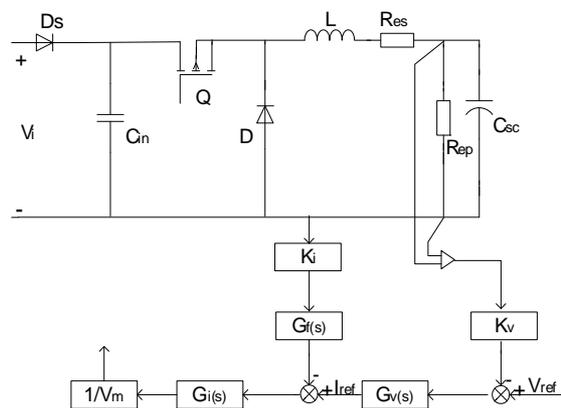


Figure 7. Charging control circuit diagram
图 7. 充电控制电路框图

5. 充电控制系统的仿真分析

5.1. 恒流充电控制的仿真

充电模式控制中，当超级电容器处于初始充电状态时，电容器两端电压很小，充电电流很大，因此充电开始阶段采用恒流充电控制模式。恒流充电控制的仿真模型如图 8 所示。

图 8 中仿真参数为：起始时间：0.00，结束时间：10.0；开关频率 $f_s = 20$ kHz；直流电压：480 V；输入电容 $C1 = 1000$ uF，输出电容 $C2 = 1000$ uF，输出电感 $L1 = 2$ mF；超级电容器容量为 1 F，串联电阻 ESR 为 0.2Ω ，并联漏电阻为 30Ω 。

恒流充电过程采用滞环电流控制，设定电流值 $I = 15$ A，当电流小于设定值时，开关管导通，电源电压大于电容器端电压，则超级电容器充电，充电电流上

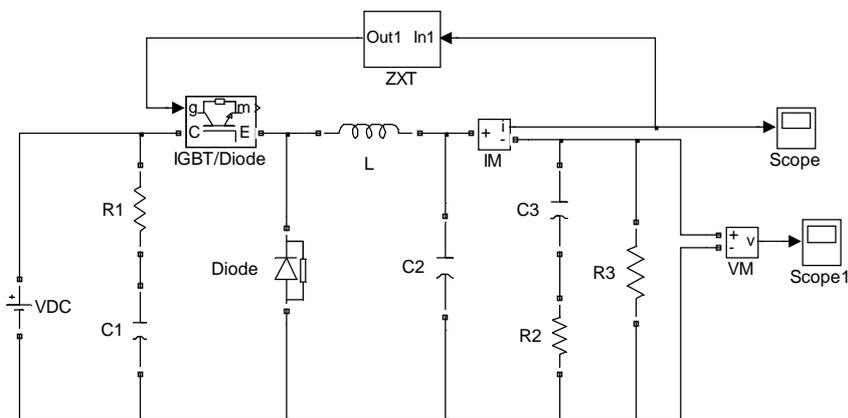


Figure 8. Constant current charging control simulation model
图 8. 恒流充电控制的仿真模型

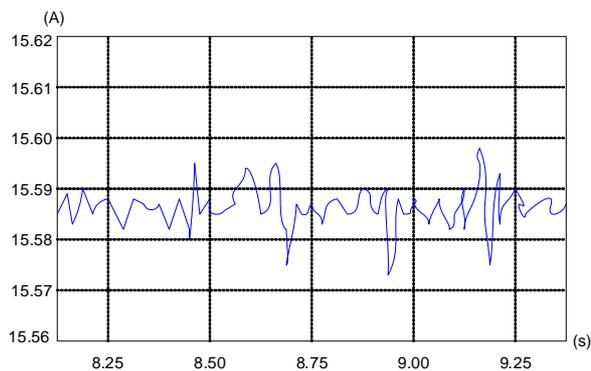
升；当电流小于设定值时，开关管关断，经过二极管续流减小，然后重复上述过程。恒流充电的电流和电压仿真波形如图 9 所示。

从图 9(a)波形可以看出，电流升高到期望电流 15 A 后，虽然电流有微小的波动，但基本维持在 15.5 A 左右。如图 9(b)所示，充电初始时刻电容两端电压很小，而充电电流很大，因此，采用恒流充电控制模式是合理的。由于电路中电容和电感的存在，波形必然会受其影响有所波动，但误差在允许范围内，验证了参数选取的合理性。

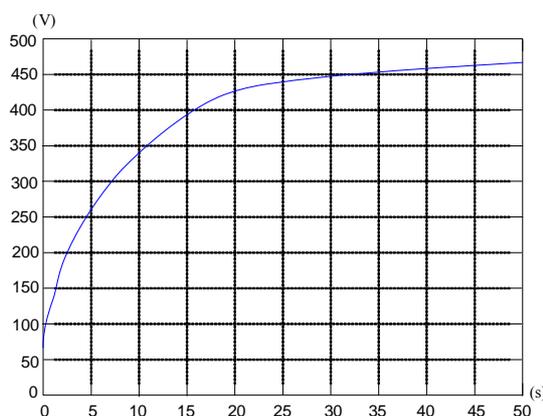
5.2. 恒压充电控制的仿真

如果充电过程一直采用恒流充电控制，则超级电容器充不满电，并且接近一半的能量损耗掉，能量利用率较小。所以当恒流充电到一定电压时，为防止过充损坏超级电容器，则对超级电容器改为恒压充电控制。恒压充电控制时，通常采用数字 PI 调节，并利用增量型 PI 控制算法来实现。恒压充电控制的仿真模型如图 10 所示。

图 10 中仿真参数为：起始时间：0.00，结束时间：10.0；直流电压：300 V；输入电容 $C1 = 1000 \mu\text{F}$ ，输出电容 $C2 = 1000 \mu\text{F}$ ，输出电感 $L1 = 2 \text{ mF}$ ；超级电容器容量为 1 F，串联电阻 ESR 为 0.2Ω ，并联漏电阻为 30Ω 。恒压充电的电流和电压仿真波形如图 11 所示。



(a) 电流波形



(b) 电压波形

Figure 9. Constant current charging control current and voltage waveform

图 9. 恒流充电控制的电流电压波形

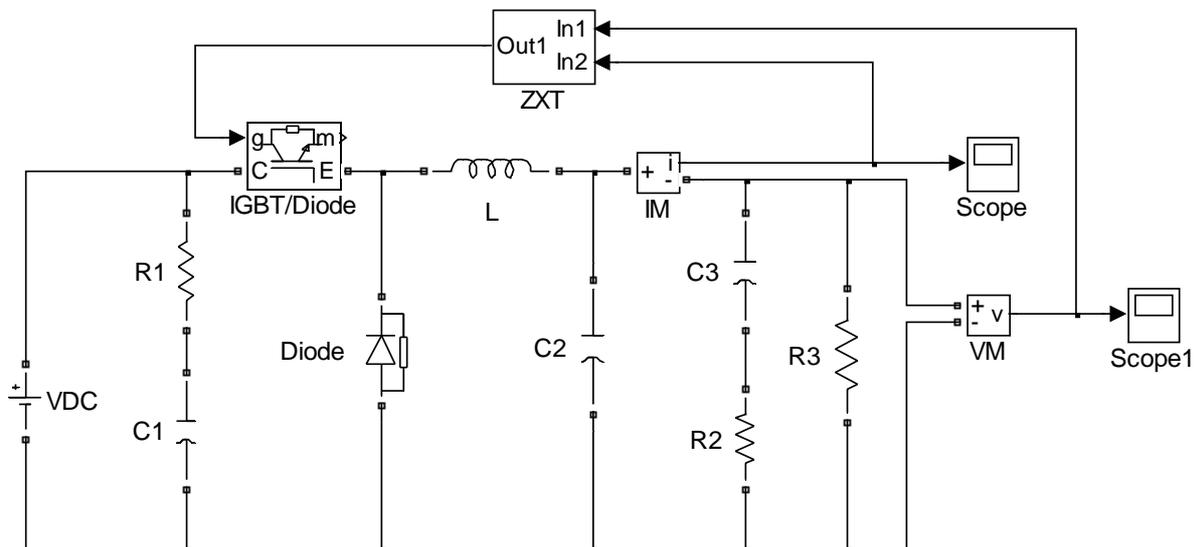
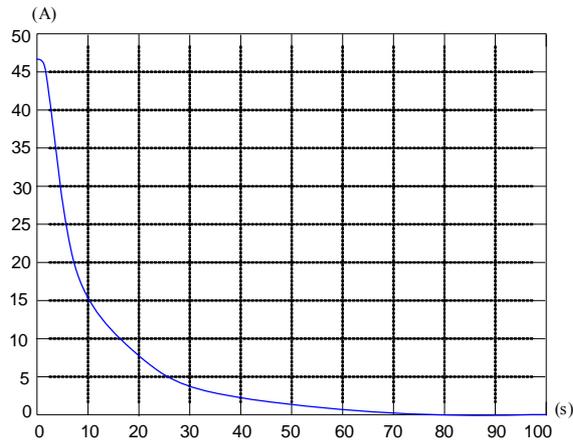
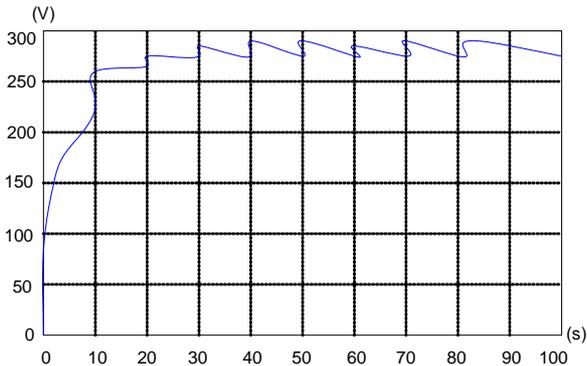


Figure 10. Constant voltage charging control simulation model

图 10. 恒压充电控制的仿真模型



(a) 电流波形



(b) 电压波形

Figure 11. Constant voltage charging control current and voltage waveform

图 11 恒压充电控制的电流电压波形

从图 11(a)中可以看出,当电压达到预充电电压而转为恒压充电时,充电电流下降很快,并且以降低的电流进行充电储能,如图 11(b)所示,当以恒压模式进行充电时,电压基本维持不变,并且一直以这种状态将电容器充满为止。

6. 结语

本文针对超级电容充电控制方面展开研究,首先提出充电控制电路设计方案,然后对充电模型元器件及参数进行选择。重点研究充电控制电路的硬件设计,其中包括驱动电路、采样隔离电路、隔离电源的设计以及信号调理电路的设计,然后对充电电路的软件进行设计。最后对充电控制系统仿真建模,对仿真结果进行分析,验证恒流充电的可行性;对充电电路恒压充电进行仿真,分析仿真结果,验证恒流充电转恒压浮充的两阶段式充电方式的合理性。

参考文献 (References)

- [1] 曹秉刚, 曹建波. 超级电容在电动车中的应用研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1318-1322.
- [2] T. Kinjo, T. Senjyu, N. Urasaki, et al. Output leveling renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2006, 21(1): 221-227.
- [3] 杨威, 杨世彦, 黄军. 超级电容器组均衡充电系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 123-126.
- [4] C. Abbey, G. Joos. Supercapacitor energy storage for wind energy applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.
- [5] 李荐, 钟晖, 钟海云等. 超级电容器应用设计[J]. 电源技术, 2004, 28(6): 388-391.
- [6] Y. Yany, D. L. Zhang and D. G. Xu. A study of supercapacitor parameters and characteristics. IEEE International Conference on Power System Technology, 2006: 1-4.
- [7] R. G. Lu, C. B. Zhu, L. K. Tian, et al. Supercapacitor stacks management system with dynamic equalization techniques. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 254-258.
- [8] 高云, 陈永真, 王春霞等. 超级电容器组单体电压的动态均衡[J]. 辽宁工学院学报, 2007, 25(6): 354-356.
- [9] 马奎安, 陈敏. 超级电容器储能系统充电模式控制的设计[J]. 机电工程, 2010, 27(7): 85-88.
- [10] 李海东, 冯之钺, 齐智平. 一种新颖的串联超级电容器组的电压均衡方法[J]. 电源技术, 2006, 30(6): 498-503.
- [11] 刘建涛, 张建成. 一种基于超级电容器的光伏系统电压控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11): 107-111.
- [12] 廖志凌, 阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 98-103.