

文章编号:1674-2869(2016)01-0082-06

# 超级电容器恒压充电的控制策略研究

张阐娟<sup>1</sup>,文小玲<sup>1\*</sup>,李康康<sup>2</sup>,李媛媛<sup>1</sup>,张双华<sup>1</sup>

1. 武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430205;

2. 郑州安图生物工程有限公司,河南 郑州 450016

**摘要:**采用超级电容器电压外环、电感电流内环的双闭环控制策略,以提高超级电容器充电控制系统的可靠性,首先利用状态空间平均法建立以BUCK变换器为主电路的超级电容器储能系统的小信号线性模型;然后,基于MATLAB/SIMULINK仿真工具箱构建了完整的超级电容器储能系统仿真模型,并对单闭环充电控制方式和双闭环充电控制方式下的超级电容器电流和电压波形进行了仿真分析.结果表明两种充电控制方式下,超级电容器的端电压都能达到预期的稳定电压12 V,但单闭环控制方式下的充电电流高达120 A,远远超过预期的稳态电流12 A,而双闭环控制方式下的最大充电电流可控制在18 A以内,稳态电流为预期的12 A,为超级电容器充电控制提供了新的思路.

**关键词:**超级电容器;状态空间平均法;电压控制;峰值电流控制

中图分类号:TM531.4 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2016.01.015

## Constant Voltage Control Scheme of Super Capacitor Charging

ZHANG Chanjuan<sup>1</sup>, WEN Xiaoling<sup>1\*</sup>, LI Kangkang<sup>2</sup>, LI Yuanyuan<sup>1</sup>, ZHANG Shuanghua<sup>1</sup>

1. School of Electronical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Antu Zhengzhou Bio Engineering Co. Ltd, Zhengzhou 450016, China

**Abstract:** We proposed a double closed-loop control strategy with external voltage-loop and inner current-loop for improving the reliability of the super-capacitor charging control system. Firstly the small signal linear model of the super capacitor energy storage system (SCESS) with BUCK converter as the main circuit was constructed by the state space averaging method. Then, the simulation model of SCESS was established by using MATLAB/SIMULINK software, and the current and voltage waveforms of the super capacitor were analyzed in the single closed-loop control mode and double closed-loop control mode. The results show that the terminal voltage of the super capacitor can reach the expected stable voltage of 12 V under the both control modes. However, the charging stable current of the super capacitor is up to 120A which is far more than the expected stable current 12 A and probably destroys the components of the SCESS in the single-closed loop control mode; the maximum charging current can be controlled within 18 A and the steady state current does not exceed 12 A in the double-closed loop control mode, which provides a new thought for the super capacitor charging control.

**Keywords:** super capacitor; state space averaging method; voltage control; loop peak current control

## 1 引言

近年来,随着能源的需求越来越大,在开发新

能源的同时,节能型电气产品受到更多的欢迎,但这些产品都离不开储能元件<sup>[1-2]</sup>.当前储能元件大多数采用铅酸蓄电池及镍镉电池等,但这些蓄电

收稿日期:2015-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51207117)

作者简介:张阐娟,硕士研究生. E-mail:witzhangej@163.com

\*通讯作者:文小玲,硕士,教授. E-mail:whwxl\_2004@163.com

池存在一些难以克服的缺点,如循环寿命短,废弃后造成环境污染,严格控制的充放电电流等.这些因素限制了新能源发电、电动汽车以及其它电气设备储能技术的发展<sup>[3]</sup>.

与其它新型储能技术如飞轮储能、超导储能、传统静电电容储能相比,超级电容器具有寿命长、功率密度高、能量密度高、响应时间快等特点.此外,超级电容器还有控制方便、转换效率高、工作温度范围宽、无污染等优点.因此,它正在发展成为一种新型、高效、实用的储能装置,且具有实现大容量电力储能、替代蓄电池的发展潜力<sup>[4-5]</sup>.

随着超级电容器研发技术的日益成熟,不同容量、不同电压等级的超级电容器得到越来越多的应用,其充放电储能也是正在成为研究的热点问题.通常采用直流变换器作为超级电容器的充电电路,本文将 Buck 变换器应用于超级电容器的充电电路,采用状态空间平均法对其进行数学建模,并利用 MATLAB/SIMULINK 仿真软件对超级电容器的单闭环恒压充电控制和双闭环恒压与峰值电流控制策略的性能进行了仿真比较分析,为下一步进行基于超级电容器的太阳能储能装置研究打下一定的基础.

## 2 超级电容器充电系统数字建模及控制策略

### 2.1 超级电容器充电电路及其数学模型

采用 Buck 变换器的超级电容器充电主电路拓扑结构如图 1 所示,主要由外加稳定输入电压源  $V_g$ 、开关管 Q、续流二极管 D、滤波电感  $L$ 、滤波电容  $C$  和超级电容器组成.其中,超级电容器采用等效理想电容  $C_{sc}$  与绝缘电阻  $R_L$  并联后再与等效电阻  $R_s$  串联的等效模型表示.图 1 中,  $I_L$  为电感电流,  $I_c$  为滤波电容电流,  $V_{sc}$  为超级电容器内部等效电容电压,  $V_o$ 、 $I_o$  分别为超级电容器的端电压和充电电流.

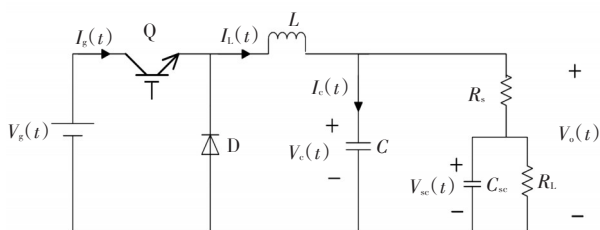


图 1 超级电容的 Buck 充电电路

Fig. 1 Buck charging circuit of super-capacitor

设开关管 Q 的开关周期为  $T_s$ 、导通时间  $T_{on}$ , 则 Buck 变换器的占空比为  $D=T_{on}/T_s$ . 在电感电流连续

方式下,该电路有以下两种工作状态. 工作状态 1: 在  $[0, T_{on}]$  阶段, 开关管 Q 导通、二极管 D 截止, 外加电压  $V_g$  通过 Q 加到电感  $L$  和电容  $C$  上、并给超级电容器供电. 工作状态 0: 在  $[T_{on}, T_s]$  阶段, 开关管 Q 关断、二极管 D 导通时, 电感  $L$  释放能量、经过二极管 D 续流给超级电容器供电.

综合分析充电电路的上述两种工作状态, 选取电感电流  $I_L(t)$ 、滤波电容电压  $V_o(t)$ 、超级电容器内部等效电容电压  $V_{sc}(t)$  作为独立状态变量, 取变换器输入电压  $V_g(t)$  作为输入变量, 变换器输入电流  $I_g(t)$  和输出电压  $V_o(t)$  作为输出变量, 可将超级电容器充电电路在开关管 Q 导通、截止两种工作状态下的综合数学模型用式(1)和式(2)所示的矩阵式状态方程和输出方程表示. 式(1)和式(2)中, 变量  $k$  表示充电电路所处的工作状态. 当  $k=1$  时, 式(1)、式(2)为充电电路处于上述工作状态 1 时的状态方程和输出方程; 当  $k=0$  时, 式(1)、式(2)为充电电路处于上述工作状态 0 时的状态方程和输出方程.

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C_{sc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_L(t) \\ V_o(t) \\ V_{sc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} \\ 0 & \frac{1}{R_s} & -\frac{R_s+R_L}{R_s \cdot R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L(t) \\ V_o(t) \\ V_{sc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_g(t)] \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_g(t) \\ V_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L(t) \\ V_o(t) \\ V_{sc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_g(t)] \quad (2)$$

若引入状态向量  $\mathbf{x}=[I_L(t) \ V_o(t) \ V_{sc}(t)]^T$ , 输出向量  $\mathbf{y}=[I_g(t) \ V_o(t)]^T$ , 输入向量  $\mathbf{v}=[V_g(t)]$ .

则采用状态空间平均法将式(1)和式(2)可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{K}}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{v} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{E}\mathbf{v} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, 参数矩阵  $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{E}$  的表达式如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} \\ 0 & \frac{1}{R_s} & -\frac{R_s+R_L}{R_s \cdot R_L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C_{sc} \end{bmatrix}$$

对式(3)所示状态方程引入小信号扰动, 消去稳态分量和忽略二次项分量, 可得到交流小信号矩阵方程如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C_{sc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{I}_L(t) \\ \hat{V}_o(t) \\ \hat{V}_{sc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} \\ 0 & \frac{1}{R_s} & -\frac{R_s + R_L}{R_s \cdot R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_L(t) \\ \hat{V}_o(t) \\ \hat{V}_{sc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{V}_g(t) + \begin{bmatrix} V_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{D}(t) \\ \begin{bmatrix} \hat{I}_g(t) \\ \hat{V}_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_L(t) \\ \hat{V}_o(t) \\ \hat{V}_{sc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{V}_g(t) + \begin{bmatrix} DV_g \\ R_s + R_L \\ 0 \end{bmatrix} \hat{D}(t) \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行拉普拉斯变换可求得超级电容器充电电路的控制-输出传递函数  $G_{vd}(s)$  为

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{D}(s)} \bigg|_{\hat{V}_g(s)=0} = \frac{(SC_{sc}R_sR_L + R_L + R_s)}{S^3LCC_{sc}R_sR_L + S^2(LCR_L + LCR_s + LC_{sc}R_L) + S(L + C_{sc}R_sR_L) + (R_L + R_s)} \cdot V_g \quad (5)$$

对式(5)进行分析, 控制-输出传递函数  $G_{vd}(s)$  有3个极点, 1个零点. 由超级电容器充电电路参数可知, 分母三次项系数与分母二次项系数相差  $10^{-3}$  数量级. 因此在后面进行控制分析时, 可忽略三次项, 简化电路的控制.

## 2.2 超级电容器充电控制策略

针对超级电容器的充电电路, 分别采用单闭环恒压充电控制方式和双闭环恒压与峰值电流充电控制方式<sup>[6]</sup>.

2.2.1 单闭环恒压控制方式 图2所示为超级电容器单闭环恒压充电控制系统原理框图, 其中PWM调制器为一个典型的比例环节, 其传递函数为

$$G_m(s) = \frac{\hat{D}(s)}{\hat{V}_c(s)} = \frac{1}{V_m}$$

分压器可等效为一个线性比例环节, 传递函

数为

$$H(s) = \frac{V_{ref}}{V_o} = H$$

充电电路变换器系统的开环传递函数为

$$G_0(s) = G_m(s)G_{vd}(s)H(s) = \frac{H}{V_m}G_{vd}(s) \quad (6)$$

式(6)中,  $H$  和  $V_m$  为常数项, 反馈电压网络  $H(s)$  及 PWM 调制器  $G_m(s)$  只对充电系统开环增益有影响,  $G_{vd}(s)$  为充电电路中占空比对输出电压的传递函数. 由式(5)可知,  $G_{vd}(s)$  为高阶系统, 但其分母中的三次项系数很小可忽略不计. 因此系统的稳定性由补偿网络  $G_c(s)$  决定. 可利用 PID 补偿网络对其进行校正, 进行补偿校正网络的参数设计时可以采取  $G_c(s)$  一个零点的频率增大低频段的增益, 以提高系统的稳态调节精度, 并且保证中频段占据充分的带宽、具备适当的相角裕度; 一个极点使高频段增益尽快减小, 以削弱噪声影响.

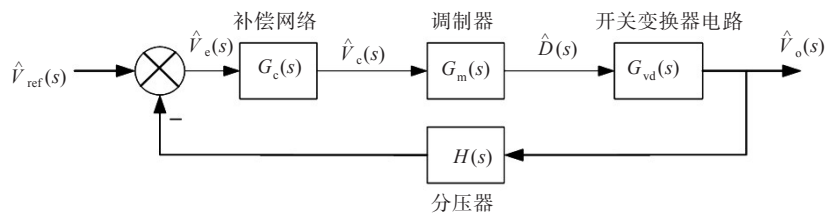


图2 单闭环恒压控制系统原理框图

Fig. 2 Principle diagram of single closed-loop control system with constant voltage

2.2.2 双闭环恒压峰值电流控制方式 为了能及时检测到变换器输入电压和负载的变化、有效控制负载电流, 采用恒压与峰值电流双闭环控制方

式. 峰值电流控制模式是指用电压控制器的输出信号  $I_L$  作为控制量, 流过电感的电流峰值  $I_L$  作为反馈量, 与电流控制器组成电流内环, 再通过触发器

达到控制开关管的导通和关断目的<sup>[7]</sup>.其中触发信号占空比 $D(t)$ 受多个变量的控制,如控制量、变换器中的电感值、输入电压、输出电压.相应的双闭环控制系统原理框图如图3所示.

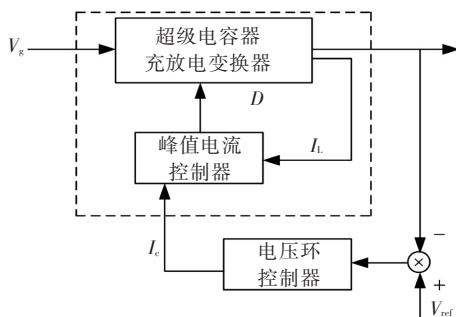


图3 恒压峰值电流双闭环控制系统原理框图

Fig. 3 Principle diagram of double closed-loop control system with constant voltage and peak current

图3中虚线框内为超级电容器充电电路变换器与峰值电流控制器 $G_i(s)$ 组成的电流控制内环,输入变量为电压外环补偿网络输出的电流控制指令信号 $I_c$ .若将虚线框内的电流控制内环等效为一个新的等效功率级,用传递函数 $G_{vc}(s)$ 描述其控制-输出( $I_c-V_o$ )的关系,可将新等效功率级电路 $G_{vc}(s)$ 与电压控制环简化成如图4所示的单闭环系统,并由此进行电压控制器 $G_v(s)$ 的设计.

当电感电流纹波及斜坡补偿信号的幅度很小

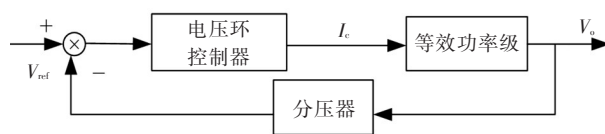


图4 等效功率级的单闭环控制系统

Fig. 4 Single closed-loop voltage control system of equivalent power level

可以忽略、并假定电感电流完全跟踪指令电流时,可将电流控制内环用一阶近似模型表示,超级电容充电电路的等效功率级传递函数为

$$G_{vc}(s) = \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{I}_c(s)} = \frac{SR_L R_s C_{sc} + (R_s + R_L)}{S^2 C C_{sc} R_L R_s + S(CR_L + CR_s + C_{sc} R_L) + 1} \quad (7)$$

由式(7)可知,等效功率级传递函数也是分子为一阶项、分母为二阶项.因此,电压控制器实质为等效功率级单闭环电压控制系统的 $G_v(s)$ 补偿网络.

### 3 系统仿真建模及分析

利用MATLAB/SIMULINK仿真软件建立前述单、双闭环系统的仿真模型,其中双闭环系统的仿真模型如图5所示.图5中,Subsystem1为Zero-Order Hold和Mean两个模块,将非连续变量转化为连续变量, $H(s)$ 为分压器, $G_v(s)$ 为电压环控制器, $G_i(s)$ 为电流环控制器.

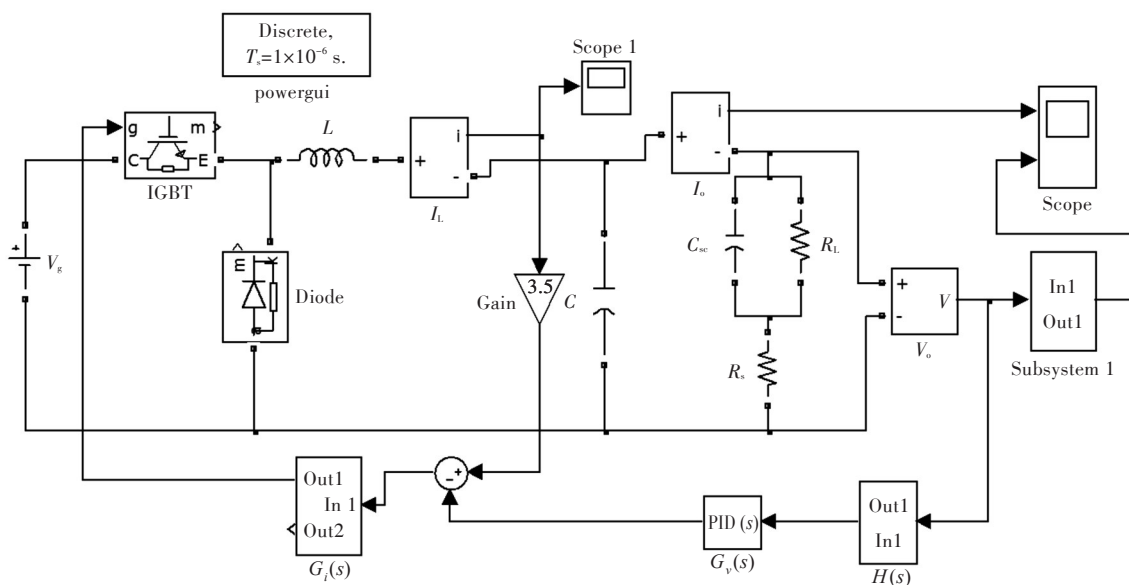


图5 超级电容器双闭环充电控制系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of double closed-loop control system for super-capacitor charging circuit

设定48 V的输入电压源给12 V的超级电容器降压充电,电路参数如表1所示,并设置锯齿波发生器的周期为 $1 \times 10^{-5}$  s.

采用单闭环恒压控制时,超级电容器端电压及其输入电流仿真波形如图6所示.由图6可看出,超级电容器端电压波形最终稳定在12 V,超调

表1 超级电容器双闭环充电电路参数

Tab. 1 Parameters of charge circuit of super capacitor double closed loop

参 数	数 值
滤波电感 $L/\text{mH}$	0.1
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	500
超级电容 $C_{sc}/\text{F}$	200
超级电容串联内阻 $R_s/\Omega$	10
超级电容并联内阻 $R_{  }/\Omega$	0.01
开关频率 $f_s/\text{kHz}$	100

量  $\sigma = \frac{15-12}{15} = 20\%$ , 峰值时间  $t_p = 0.01\text{ s}$ , 调节时间  $t_s = 0.6\text{ s}$ . 由此可以看出, 其充电速度较快, 这是比较理想的结果. 但是, 流过超级电容器的充电电流

最高冲到 141 A、且最后稳定在 120 A, 冲击电流过大很可能会烧坏元器件. 因此, 需要对超级电容器的充电电流进行控制, 可采用双闭环恒压峰值电流控制方法, 限制负载电流和电感电流, 最终达到稳定电压输出的目的.

采用双闭环恒压、峰值电流控制时, 超级电容器端电压及其输入电流仿真波形如图 7 所示. 由图 7 可知, 超级电容器端电压波形调节时间  $t_s = 0.06\text{ s}$ , 能迅速达到 12 V 的输出电压; 流过超级电容器的电流最高只有 18 A, 且可稳定在 12 A, 大大降低了超级电容器充电电流. 综上所述, 采用双闭环控制方式, 不仅充电时间更短、电压更稳定, 而且还可以控制充电电流.

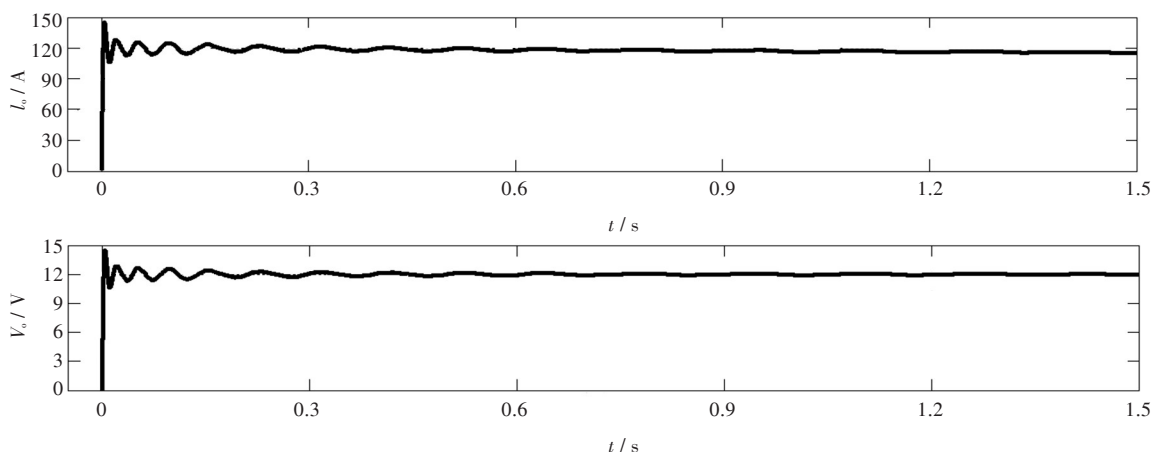


图6 单闭环控制时超级电容器电流和电压的关系

Fig. 6 Relation of current and voltage of super capacitor in single closed loop control

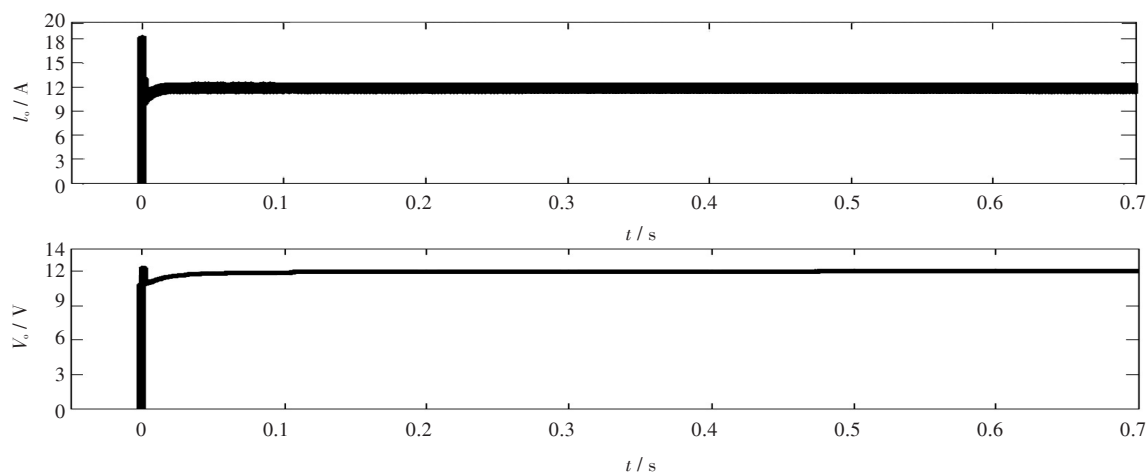


图7 双闭环控制时超级电容器电流和电压的关系

Fig. 7 Relation of current and voltage of super capacitor in double closed loop control



## 4 结 语

通过建立超级电容器充电电路的数学建模,并对单闭环恒压控制和双闭环恒压峰值电流控制进行仿真建模并比较分析的结果表明,对超级电容器的充电过程进行双闭环恒压峰值电流控制,不仅可以实现恒压控制而且能有效限制充电电流,以免造成电流过高而烧坏电路中的元器件.为下一步研究超级电容器储能系统打下一定的理论基础.

### 参考文献:

- [1] 马奎安,陈敏. 超级电容器储能系统充电模式控制设计[J]. 机电工程, 2010, 27(7): 85-88.  
MA K A, CHEN M. Charge mode control design for super-capacitor energy storage system [J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2010, 27 (7) : 85-88.
- [2] 骆妮,李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 71-79.  
LUO N, LI J L. Research progress of energy storage technology in pow system [J]. Power system and clean energy, 2012, 28(2): 71-79.
- [3] 蒋玮,胡仁杰,张金龙. 光伏直流系统中超级电容充电电路设计与分析[J]. 电源技术, 2011, 135(7): 847-857.  
JIANG W, HU R J, ZHANG J L. Design and analysis of charging supercapacitor in PV DC system [J]. Chinese journal of power sources, 2011, 135 (7) : 847-857.
- [4] 符江升. 基于超级电容储能的光伏发电系统技术研究[D]. 四川: 西南交通大学. 2012: 1-73.
- [5] 王睿敏,熊远生,刘青松. 独立光伏系统中超级电容充电控制策略研究[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(5): 166-167.  
WANG R M, XIONG Y S, LIU Q S. Super capacitor charging control strategy of independent photovoltaic system [J]. Industrial control computer, 2015, 28(5): 166-167.
- [6] 程红,王聪,王俊. 开关变换器建模、控制及其控制器的数字实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [7] 张卫平. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

本文编辑:陈小平



(上接第81页)

- ZHANG Z X, WANG S, GU B Q, et al. Properties of gasket in high temperature and expression method [J]. Process equipment and piping, 2001, 38(4): 62-64.
- [4] 蔡仁良,蔡暖妹,章兰珠,等. 螺栓法兰接头安全密封技术(二)——基于控制泄漏率的垫片应力及其试验方法[J]. 化工设备与管道, 2012, 49(5): 1-10.  
CAI R L, CAI N S, ZHANG L Z, et al. Safe sealing technology for bolted flange connection (2) ——gasket stress based on leakage control and its test Method. [J]. Process equipment and piping, 2012, 49(5): 1-10.
- [5] 管法兰用垫片的密封特性试验方法. JIS B2490:2008 [S]. 东京:日本标准委员会, 2008.
- [6] PAYNE J, DERENNE M. Standard test method for gasket constants for bolted flange joint design. ROTT draft 10.01 [S]. Montreal Canada: Tightness testing and research laboratory, 2001.
- [7] 张小芳. 蠕变—疲劳交互条件下不同材料的持久性及寿命预测[D]. 上海:华东理工大学, 2014.
- [8] 李多民,段滋华,仇性启. 波齿复合垫片常温压缩回弹性能试验研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(3): 91-93.  
LI D M, DUAN Z H, QIU X Q. Research on the compressibility and resilience of the gaskets reinforced by corrugated metal sheet at room temperature [J]. Lubrication engineering, 2009, 34(3): 91-93.

本文编辑:陈小平