

1-15-2024

## Main circuit design and controller parameters tuning of charging-discharging system for supercapacitor

Huawei LUO

*Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410004, China, lhwhnu@163.com*

Yunlong ZHENG

*Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410004, China*

Liang ZHOU

*Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410004, China*

Zhengbin QIN

*Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410004, China*

Shan XU

*Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410004, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

LUO, Huawei; ZHENG, Yunlong; ZHOU, Liang; QIN, Zhengbin; XU, Shan; XU, Zhiqiang; LENG, Zhaojin; and TANG, Xin (2024) "Main circuit design and controller parameters tuning of charging-discharging system for supercapacitor," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 38: Iss. 5, Article 27.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.027

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/27>

This Technology Application is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact [dlxb04@163.com](mailto:dlxb04@163.com).

---

## Main circuit design and controller parameters tuning of charging-discharging system for supercapacitor

### Authors

Huawei LUO, Yunlong ZHENG, Liang ZHOU, Zhengbin QIN, Shan XU, Zhiqiang XU, Zhaojin LENG, and Xin TANG

# 超级电容充放电系统的主电路设计与 控制器参数整定

罗华伟<sup>1</sup>, 郑云龙<sup>1</sup>, 周亮<sup>1</sup>, 秦正斌<sup>1</sup>, 许珊<sup>1</sup>, 徐志强<sup>1</sup>, 冷照进<sup>1</sup>, 唐欣<sup>2</sup>

(1. 湖南经研电力设计有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:** 超级电容虽具有充放电速度快、功率密度高等特点, 但其充放电系统存在易受变流器固有非线性特性以及充放电电压扰动影响等问题。为了解决此类问题, 构建了含双向 DC-DC 变流器的超级电容充放电系统主电路, 通过满足电流连续性以及控制直流母线电压波动在允许范围内等条件, 设计了主电路中的续流电感值和稳压电容值; 为增强充放电系统的鲁棒性, 采用了定电流控制策略, 并完成了恒流方式下 PI 控制器参数整定。仿真结果表明, 在充放电电压扰动作用下, 超级电容充放电系统能够使电感电流稳定输出, 且纹波较小, 具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 超级电容; 充放电控制; 主电路; 定电流控制策略

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.027 中图分类号: TM131.3 文章编号: 1673-9140(2023)05-0262-07

## Main circuit design and controller parameters tuning of charging-discharging system for supercapacitor

LUO Huawei<sup>1</sup>, ZHENG Yunlong<sup>1</sup>, ZHOU Liang<sup>1</sup>, QIN Zhengbin<sup>1</sup>, XU Shan<sup>1</sup>,  
XU Zhiqiang<sup>1</sup>, LENG Zhaojin<sup>1</sup>, TANG Xin<sup>2</sup>

(1. Hunan Economy Institute Electric Power Design Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Although the supercapacitor has the characteristics of fast charging-discharging speed and high power density, its charging-discharging system is vulnerable to the inherent nonlinear characteristic of converter and the impact of charging-discharging voltage disturbance. The main circuit of the charging-discharging system for supercapacitor is constructed with a bi-directional DC-DC converter, and the inductance and capacitance are designed under the conditions of current continuity and DC-bus voltage fluctuation in the allowed range. In order to enhance the robustness of the charging-discharging system, a control strategy with constant current is adopted and PI controller parameters are adjusted under the constant current mode. Simulation results show that the charging-discharging system for supercapacitor not only achieve the output current stably flowing through with small ripple, but also has strong robustness.

**Key words:** supercapacitor; charging-discharging control; main circuit; control strategy with constant current

由于直流微网并不存在同步并网、无功补偿以及谐波抑制等需求, 且其运行效率相较于交流微网

更高<sup>[1-3]</sup>, 因此直流微网是当前的研究热点。因受到风、光等新能源发电不连续和不固定的影响, 在直

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51977013)

通信作者: 罗华伟(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计研究; E-mail: lhw@163.com

流微网中如何保持功率平衡是难点所在,因此深入研究直流微网中储能系统及其控制技术,具有重要的理论价值和实际意义。

作为一种新型的储能设备,超级电容具有功率密度高、充电速度快、放电能力强、循环使用寿命长等优点<sup>[4-5]</sup>,随着成本的逐渐降低,它越来越多地被投入到了实际应用中,比如电容式整流分合闸装置、大功率直流电机启动、轨道交通节能装置及直流微网<sup>[6-7]</sup>等。基于超级电容的储能系统一般由超级电容组和电力电子变流器所构成。由于超级电容在充放电过程中,其两端电压变化范围很大,因此需要通过 DC-DC 变流器来与直流微网互联,使得超级电容在向负载输送能量或从微网吸收能量时,能够提供恒定的直流母线电压<sup>[8]</sup>。一方面,随着新能源并网容量不断扩大,随机性和波动性对电网稳定运行的影响逐渐增大<sup>[9]</sup>;另一方面,储能系统中的变流器属于一种非线性系统<sup>[10]</sup>,其对参数变化比较敏感,抗扰动能力较差。因此,如何在满足超级电容特性的基础上,设计出 DC-DC 变流器参数,并通过合理的控制策略实现超级电容充放电控制有待深入研究。

本文提出一种超级电容充放电系统的主电路设计与控制器参数整定方法。在明确实际应用中超级电容组所需能量和额定功率的基础上,确定组内单体电容真实串并联个数和最大允许充放电电流;通过满足电流连续性以及控制直流母线电压波动在允许范围内等条件,设计主电路中的续流电感值和稳压电容值;为了满足超级电容快速充放电需求,采用定电流控制策略,借助频率特性法计算得到恒流方式下 PI 控制器参数。所设计的充放电系统能够实现在超级电容快速充放电过程中,电感电流稳定输出,且纹波较小,整个系统具有较强的鲁棒性。

## 1 超级电容工作原理及其等效模型

### 1.1 超级电容的工作原理

根据工作机理的不同,超级电容可分为双电层电容和法拉第电容<sup>[11]</sup>。由于前者相较于后者的功率密度、能量密度都更优,能量的存储和释放也更为迅速,因此本

文主要对图 1 所示的碳极双电层超级电容进行研究。

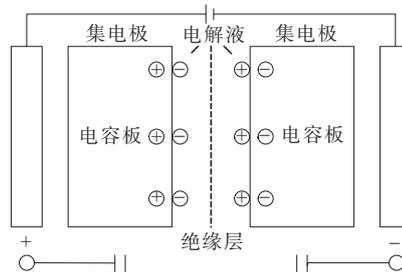


图 1 双电层超级电容结构

Figure 1 Structure of electric-double-layers supercapacitor

在图 1 所示的超级电容两端加上电场后将形成正负极板,此时电解质中的正离子向负极板移动,负离子则向正极板移动,从而在两块极板上聚集极性相反、电荷量相同的电荷,进而内部建立起平衡电场,构成双电层结构。当撤去电场后,电极板上的正负电荷会被电解质中带电的异性离子所吸引,因此双层电场将会稳定下来,在正负电极板之间形成一个相对稳定的电动势。由于超级电容是利用电荷的储存和释放来实现能量储放,并不涉及化学反应,故而具有充放电速度快、循环次数多、使用寿命长等优点,可作为稳定的电源所使用。

### 1.2 超级电容的等效模型

超级电容的内部结构较为复杂,主要的等效模型有戴维南等效电路模型、一阶 RC 动态响应模型、 $n$  阶 RC 动态响应模型以及非线性响应模型 4 种<sup>[11-12]</sup>,但 4 种模型的参数计算都较为复杂。本文根据实际工况需求,采用如图 2 所示的等效模型。

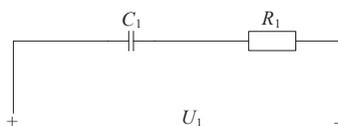


图 2 超级电容等效模型

Figure 2 Equivalent model of supercapacitor

图 2 中, $C_1$  为理想电容; $R_1$  为等效内阻,其值往往较小,主要用于表征超级电容充放电过程中所消耗的电能; $U_1$  为超级电容端电压。

## 2 主电路设计与控制

### 2.1 主电路拓扑及其工作原理

超级电容充放电系统的结构如图 3 所示。图 3

中,  $C_1$  为超级电容,  $R_1$  为其等效电阻,  $C_2$  为稳压电容,  $L$  为续流电感,  $Q_1$ 、 $Q_2$  和  $D_1$ 、 $D_2$  分别为 2 个绝缘栅双极型晶体管及其与之相反并联的 2 个电力二极管,  $U_1$ 、 $U_2$  分别为超级电容电压、直流母线电压。通过对 DC-DC 变流器的控制, 一方面, 当工作在放电模式时, 将电能从超级电容输送到直流微网系统, 当工作在充电模式时, 则使得直流微网系统的电能被超级电容所吸收; 另一方面, 在上述超级电容充放电过程中, 始终满足直流母线电压稳定以及超级电容的充放电电流、充放电电压均不超过额定值的要求。

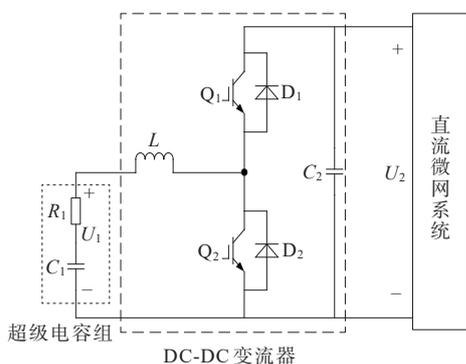


图3 主电路简化模型

Figure 3 Simplified model of main circuit

根据充放电过程的要求, 图3所示的 DC-DC 变流器须具备能量双向流动的功能, 且可在 Boost 和 Buck<sup>[13-14]</sup> 2 种模式下实现无缝切换。当能量由超级电容流向直流微网, 即超级电容工作在放电模式时, 绝缘栅双极型晶体管  $Q_2$  由 PWM 信号驱动,  $Q_1$  闭锁以避免引起  $C_2$  短路而烧毁器件, 电力二极管  $D_2$  始终保持断态, 而  $D_1$  则与  $Q_2$  处于互补状态:  $Q_2$  通态时  $D_1$  因承受  $C_2$  上的反向电压而处于断态;  $Q_2$  断态时  $D_1$  因  $L$  的电压泵升作用而处于通态, 此时的变流器工作在 Boost 模式。当能量由直流微网流向超级电容, 即超级电容工作在充电模式时, 绝缘栅双极型晶体管  $Q_1$  由 PWM 信号驱动,  $Q_2$  闭锁以避免引起  $C_2$  短路而烧毁器件, 电力二极管  $D_1$  始终保持断态, 而  $D_2$  则与  $Q_1$  处于互补状态:  $Q_1$  通态时  $D_2$  因承受  $C_2$  上的反向电压而处于断态;  $Q_1$  断态时  $D_2$  因  $L$  的续流作用而处于通态, 此时的变流器工作在 Buck 模式。现以 Boost 模式为例, 对 DC-DC 变流器进行模态分析:

$$U_L = U_1, 0 < t < DT_s \quad (1)$$

$$U_L = U_1 - U_2, DT_s < t < T_s \quad (2)$$

式中,  $U_L$  为续流电感电压;  $D$  为 PWM 波的占空比, 其取值范围为  $(0, 1)$ ;  $T_s$  为开关周期。

根据伏秒平衡原理, 在稳态时, 一个开关周期内电感  $L$  上的平均电压为零, 故有:

$$U_1 DT_s + (U_1 - U_2) \cdot (1 - D) T_s = 0 \quad (3)$$

从而可得双向 DC-DC 变流器工作在 Boost 模式时的输入输出电压关系为

$$U_2 = \frac{U_1}{1 - D} \quad (4)$$

根据选定的超级电容电压  $U_1$  和实际工程中的直流母线电压  $U_2$ , 即可确定 Boost 模式下的稳态占空比  $D$ ; 同理, 可得 Buck 模式下的稳态占空比。

## 2.2 主电路参数设计

根据实际应用中超级电容组能量和额定功率的需求, 就可确定组内单体电容真实串并联个数以及允许的最大充放电电流。

超级电容组的能量管理公式如下:

$$W = \frac{1}{2} C_1 (U_{\max} - U_{\min}) \quad (5)$$

式中,  $W$  为超级电容组的能量;  $C_1$  为超级电容组的等效电容值;  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为超级电容组上电压的最大、最小值。

根据实际应用中超级电容组额定功率和供电时长的需求, 以及对能量  $W$  的需求, 结合充放电所对应的电压最大值  $U_{\max}$ 、电压最小值  $U_{\min}$ , 即可由式(5)算得超级电容组的电容值  $C_1$ ; 进而根据市场上超级电容供货商提供的单体电容型号就能确定组内单体电容的串并联个数。在满足单体电容串并联后电容值等效为  $C_1$  以及超级电容最大功率不超出其额定功率这 2 个约束条件的基础上, 就能获得超级电容允许的最大充放电电流。

由文献[15]可知, 确保流经  $L$  上的电流连续、波动较小, 必须满足以下条件:

$$y_1 = \frac{e^{\frac{U_1 T_s R_1}{U_i L}} - 1}{\frac{T_s R_1}{U_i L} - 1} - m > 0 \quad (6)$$

$$y_2 = I_{sc, \max} - \left( \frac{1 - e^{-\frac{U_1 T_s R_1}{U_i L}}}{1 - e^{-\frac{T_s R_1}{L}}} - m \right) \cdot \frac{U_2}{R_1} > 0 \quad (7)$$

$$y_3 = \left( e^{\frac{U_1 T_i R_1}{U_1 L}} - 1 - m \right) \cdot \frac{U_2}{R_1} - I_{sc, \min} > 0 \quad (8)$$

式(6)~(8)中,  $m=U_1/U_2$ ;  $I_{sc, \max}$ 、 $I_{sc, \min}$  分别为电感  $L$  上电流的最大、最小值。

根据式(6)~(8)这 3 个约束条件即可确定电感  $L$  的取值范围,进而综合考虑设计裕量、成本、双向 DC-DC 变流器输入侧电压波动较小等因素取定电感值。

电容  $C_2$  则按允许的 5% 直流母线电压波动率<sup>[16]</sup>来设计,如下:

$$C_2 > \frac{I_{o, \max}}{0.05 \times U_2} D_{\max} T_s \quad (9)$$

式中,  $I_{o, \max}$ 、 $D_{\max}$  分别为最大输出电流和最大占空比。

在满足电流连续性定则、电压波动率在一定范围内等条件的基础上,就能求出所需的电感值  $L$ 、电容值  $C_2$ 。

### 2.3 恒流控制参数整定

基于上述主电路参数,结合超级电容与 DC-DC 电路的非线性特征<sup>[17-18]</sup>,本文采用如图 4 所示的单环定电流控制。

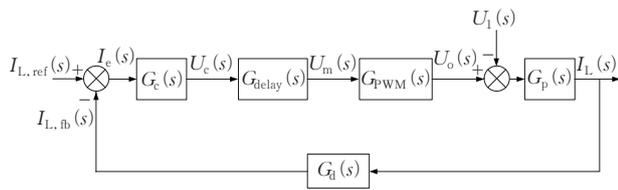


图 4 定电流控制

Figure 4 Constant current control

由于超级电容自身的端电压随能量变化而变化,因此定电流控制不易出现因超级电容电压较小而流入大电流导致其损坏甚至烧穿的情况。通过对超级电容自身电压和电流进行控制,即可对其功率进行有效控制。

受控对象的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{1}{Ls + R_1} \quad (10)$$

电流控制环其他各部分的传递函数如下:

$$G_c(s) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (11)$$

$$G_{\text{delay}}(s) = \frac{1}{T_{\text{delay}} s + 1} \quad (12)$$

$$G_{\text{PWM}}(s) = U_2 \quad (13)$$

$$G_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1} \quad (14)$$

式中,  $K_p$ 、 $T_i$  分别为 PI 控制器  $G_c(s)$  的比例常数、积分时间常数;  $T_{\text{delay}}$  为延迟环节  $G_{\text{delay}}(s)$  的时间常数;  $G_{\text{PWM}}(s)$  为功率放大环节的传递函数;  $K_d$ 、 $T_d$  为检测电路  $G_d(s)$  的参数。

结合式(10)~(14)即可获得整个系统的开环控制函数:

$$G_{\text{ol}}(s) = G_c(s) G_{\text{delay}}(s) G_{\text{PWM}}(s) G_p(s) G_d(s) \quad (15)$$

令式(15)中  $s=j\omega$ , 则可得幅频、相频特性,进而可根据以下公式所示的频率特性法算得 PI 控制器的  $K_p$ 、 $T_i$  参数。

$$\begin{cases} |G_{\text{ol}}(j\omega_c)| = 1 \\ \angle G_{\text{ol}}(j\omega_c) = -180^\circ + \gamma \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\omega_c$ 、 $\gamma$  分别为指定的穿越频率、相位裕度。

## 3 仿真结果与分析

为了验证超级电容充放电系统的主电路设计与控制器参数整定的有效性,以及电感波纹电流的控制效果,本文通过 MATLAB 软件求解了主电路和控制器参数,并应用 PSIM 软件进行了仿真验证。

本文所选单体超级电容的内阻  $R_{sc0}=0.021 \text{ } \Omega$ 、最大电压  $U_0=16 \text{ V}$ ;工程中对超级电容组提出的配置需求为  $115 \text{ kW}/14.375 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,允许最大充放电电流  $I_{sc}=200 \text{ A}$ 。出于裕量考虑,本文将超级电容的额定充放电电流选为  $193 \text{ A}$ ,根据额定功率  $115 \text{ kW}$  反推出额定电压为  $587 \text{ V}$ ,通过仿真得出,单体电容的串联个数达到 38 时可获得额定电压;并联个数达到 90 时,可在额定电流充电条件下,  $450 \text{ s}$  时充至额定电压,如图 5 所示。

根据所确定的超级电容组具体配置,结合直流母线电压  $U_2=750 \text{ V}$ ,超级电容组额定电压  $U_1=587 \text{ V}$ 、等效电阻  $R_1=0.0089 \text{ } \Omega$ ,即可利用式(6)~(8)给出的

电流连续性定则等条件算出续流电感值 $L$ 。本文设计的电感电流最大、最小值分别为 $I_{sc,max}=196\text{ A}$ 、 $I_{sc,min}=190\text{ A}$ 。如图6、7所示,主电路中电感 $L$ 需要满足3个约束条件:为了满足式(6)的连续性定则,需使连续性曲线 $y_1$ 大于0;为确保电感电流小于 $I_{sc,max}$ 、大于 $I_{sc,min}$ ,需满足式(7)、式(8)中 $y_2>0$ 、 $y_3>0$ 。在此基础上,综合考虑设计裕量、成本等因素求得电感值 $L=0.005\text{ H}$ 。

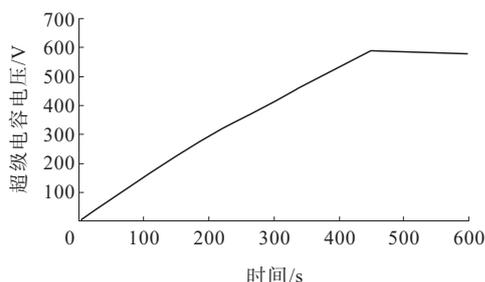


图5 超级电容充电电压曲线

Figure 5 Charging voltage curve of supercapacitor

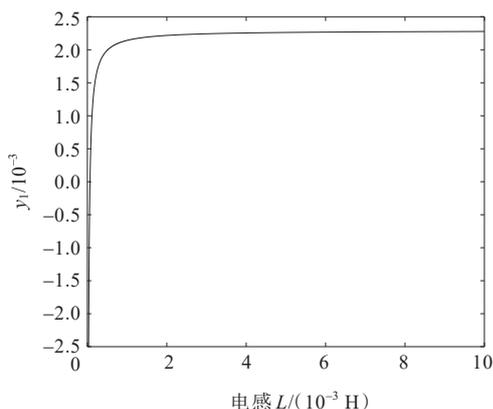


图6 电流连续性定则

Figure 6 Current continuity rule

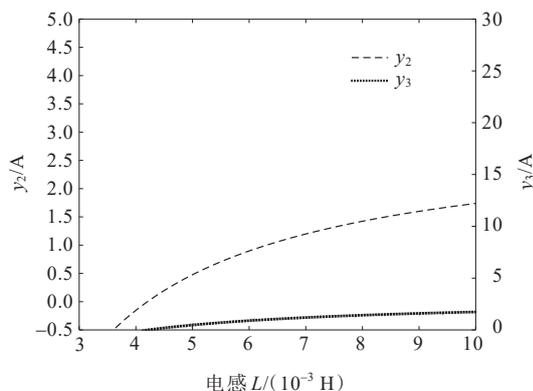


图7 电感电流波动限制

Figure 7 Fluctuation limit of inductive current

在求得主电路参数后,需对PI控制器参数进行整定。本文选择的穿越频率为 $500\text{ Hz}$ 、相位裕度为 $45^\circ$ ,由式(16)求得 $K_p=14.902$ , $T_i=0.561$ 。

本文通过在超级电容侧同时串联频率为 $400\text{ Hz}$ 、峰值为 $15\text{ V}$ 的扰动源1,频率为 $600\text{ Hz}$ 、峰值为 $15\text{ V}$ 的扰动源2, $-1\text{ V}$ 到 $1\text{ V}$ 随机变化的扰动源3,以验证在闭环控制系统截止频率之内PI控制器对扰动的有效抑制。如图8所示,即使加入用以模拟超级电容端电压变化的扰动量,电感电流仍被精准地控制在 $193\text{ A}$ 上下,波动范围不超过 $3\text{ A}$ ,从而可获得良好的动态性能,快速地完成充电目标。

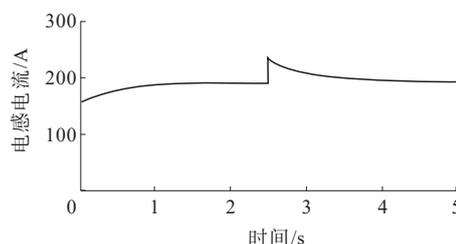


图8 扰动下的电感电流

Figure 8 Inductive current under disturbance

本文还以超级电容充电储能为例,验证了定电流控制策略下,超级电容在充电时的启动能力。由图9中的电感电流波形可知,系统启动响应时间较短,能够很快稳定在参考电流 $193\text{ A}$ 对超级电容进行近乎无波动地恒流充电,表明超级电容可迅速存储能量;由图10则可以看出,通过双向DC-DC变流器向超级电容充电时,超级电容的端电压平稳上升,传输能量稳定,显然满足了超级电容的充电需求。

上述仿真结果充分表明:

- 1) 实际应用中满足对超级电容组能量和额定功率的需求,可完成超级电容组的具体配置;
- 2) 在超级电容充放电过程中,电感电流的波动符合预期,实现了稳定控制。

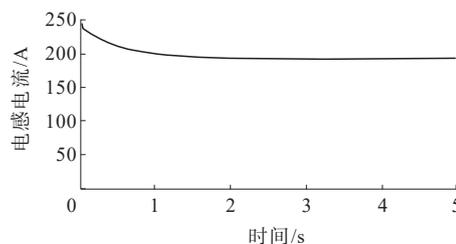


图9 超级电容充电时的电感电流

Figure 9 Inductance current when supercapacitor charged

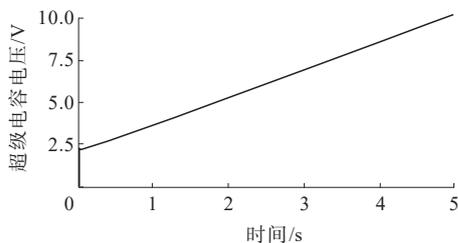


图10 超级电容端电压

Figure 10 Supercapacitor terminal voltage

## 4 结语

本文提出了一种超级电容充放电系统的主电路设计与控制器参数整定方法,用于实现直流微网功率平衡和稳定直流母线电压。

1) 所述系统由双向DC-DC变流器、超级电容、直流微网系统等组成。当超级电容工作在放电模式时,将电能从超级电容输送到直流微网系统;当超级电容工作在充电模式时,直流微网系统的电能将通过DC-DC变流器的控制为超级电容所吸收。

2) 通过满足电流连续性以及控制直流母线电压波动在允许范围内等条件,设计了主电路中的续流电感值和稳压电容值;为了满足超级电容快速充放电的需求,采用了恒流控制,通过传递函数计算,得出了所需要的PI参数值。

3) 仿真结果表明,所设计的充放电系统能够实现超级电容按工况需求充放电,解决了超级电容与DC-DC变流器的控制匹配问题。

### 参考文献:

- [1] 张新民,郭铭海,林亚培,等.考虑灵活性的含分布式光伏配电网双层优化调度方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):56-66.  
ZHANG Xinmin, GUO Minghai, LIN Yapei, et al. A bi-layer optimal dispatch approach for distribution networks with distributed photovoltaic considering the flexibility[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):56-66.
- [2] 段建东,孙茜,陈鲁鹏,等.基于改进和声搜索算法的有

源配电网优化调度[J].高压电器,2021,57(11):1-9.

DUAN Jiandong, SUN Qian, CHEN Lupeng, et al. Optimal dispatching of active distribution network based on improved harmony search algorithms[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11):1-9.

- [3] 林其友,蒋文良,李媛媛,等.基于母线电压分层的直流微网系统协调控制[J].中国电力,2022,55(2):166-171,180.

LIN Qiyu, JIANG Wenliang, LI Yuanyuan, et al. Coordinated control of DC microgrid system based on bus voltage stratification[J]. Electric Power, 2022, 55(2):166-171,180.

- [4] 王苏蓬,张新慧,吴文浩,等.用于风电平抑的混合储能选型和容量优化配置方法[J].智慧电力,2021,49(9):16-23.

WANG Supeng, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Hybrid energy storage selection and capacity optimization configuration method for wind power smoothing[J]. Smart Power, 2021, 49(9):16-23.

- [5] 孙立明,杨博.超级电容储能系统的无源分数阶滑模控制设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(16):76-83.

SUN Liming, YANG Bo. Passive fractional-order sliding-mode control design of a supercapacitor energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16):76-83.

- [6] 冯奕,应展烽,颜建虎.考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):92-99.

FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8):92-99.

- [7] 孟巍,郭腾炫,刘映娟,等.基于粒子群算法的多电源配电网储能功率配置方法[J].电网与清洁能源,2021,37(11):109-114.

MENG Wei, GUO Tengxuan, LIU Yijuan, et al. An energy storage configuration method for multi-power distribution network based on particle swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(11):109-114.

- [8] 刘继超,王维庆,王海云.基于DSLPSO算法的超级电容参数辨识[J].电测与仪表,2021,58(6):33-38.

LIU Jichao, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Parameter

- identification of super capacitor based on DSLPSO algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021,58(6):33-38.
- [9] 金浩哲,陈武.基于 GaN 器件的直流配电网用户侧 DC/DC 变换器设计[J]. *电力工程技术*,2022,41(3):209-215.  
JIN Haozhe, CHEN Wu. Design of GaN-based user side DC/DC converter in DC distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2022,41(3):209-215.
- [10] 卢林煜,王鲁杨,恽东军,等.基于柔性配电网级联 H 桥固态变压器电压与功率均衡控制策略[J]. *电力科学与技术学报*,2021,36(1):152-159.  
LU Linyu, WANG Luyang, YUN Dongjun, et al. Research on voltage and power balance control strategy of cascaded H-bridge solid state transformer based on flexible distribution networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2021,36(1):152-159.
- [11] YUVARAJA T, RAMESHKUMAR K A. Super capacitor model and its operational simulation for photo-voltaic generation system[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*,2018,15(6):2109-2114.
- [12] LI Q, ZHANG W B, LI P, et al. On the research of identification methods for supercapacitor model parameters[J]. *Applied Mechanics and Materials*,2015,740: 499-502.
- [13] 赵鹏.一款 2.5 A 电流模式 Buck 型 DC-DC 的研究与设计[J]. *电子设计工程*,2022,30(9):144-148.  
ZHAO Peng. Research and design of a 2.5 A current mode Buck DC-DC[J]. *Electronic Design Engineering*, 2022, 30 (9):144-148.
- [14] 范磊,党寻诣,宋克岭,等.双向 Buck/Boost 变换器损耗分析[J]. *车辆与动力技术*,2022(1):1-5.  
FAN Lei, DANG Xunyi, SONG Keling, et al. Loss analysis of Bi-directional Buck/Boost converter[J]. *Vehicle & Power Technology*,2022(1):1-5.
- [15] 王兆安,刘进军. *电力电子技术*[M].北京:机械工业出版社,2009:121-122.  
WANG Zhaoan, LIU Jinjun. *Power electronics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2009:121-122
- [16] RAJARAJESWARI N, THANUSHKODI K. Bi-directional DC-DC converter with adaptive fuzzy logic controller[J]. *Elektronika Ir Elektrotechnika*,2009(1):65-68.
- [17] 王雪琪,李鹏,刘树晓.超级电容在直流操作电源系统中的应用[J]. *机电工程技术*,2008,37(4):80-82+111+112.  
WANG Xueqi, LI Peng, LIU Shuxiao. Application of super capacitor in DC operating power supply system[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*,2008,37 (4):80-82+111+112.
- [18] 刘晓东,李飞,方炜,等.直流微网中双向直流变换器的控制[J]. *电源学报*,2014,12(5):40-44.  
LIU Xiaodong, LI Fei, FANG Wei, et al. Control of Bi-directional DC converter in DC micro network[J]. *Journal of Power Supply*,2014,12(5):40-44.