



超级电容器复合电源拓扑分析

刘光林, 蒲启婵, 刘玲玲

(贵州梅岭电源有限公司, 贵州 遵义 563000)

摘要: 针对超级电容器在能量密度、电压及自放电等方面的局限性, 为提升电源系统的综合性能, 探讨了将其与锂离子电池结合的复合电源拓扑, 旨在通过二者的优势互补, 实现能量与功率性能的协同优化, 以适应高功率脉冲、频繁循环等复杂工况需求。研究过程以超级电容器与锂离子电池的物理模型为基础, 首先理论分析了两者的输出特性差异, 重点比较了内阻、电压平台及放电曲线等关键参数。系统构建并仿真了5种超级电容器锂离子电池的复合电源拓扑结构, 包括直接并联、通过电感并联、通过电阻并联、通过DC/DC并联以及通过双向DC/DC并联。通过建立仿真实验平台, 设定脉冲负载工况, 定量对比分析了不同拓扑下母线电压的动态响应、超级电容器与锂离子电池之间的电流分配特性以及超级电容器的能量利用率。研究表明, 复合电源能有效提升系统脉冲功率能力并延长锂离子电池寿命。在5种拓扑中, 直接并联与电阻并联结构简单, 分配的脉冲电流与两种储能元件的内阻成反比, 但存在母线压降大和超级电容器利用率受限的问题; 电感并联可抑制锂离子电池的放电电流, 但电感会引起母线过压尖峰; 通过DC/DC并联能精确限制锂离子电池输出电流并提升超级电容器的利用率; 而通过双向DC/DC并联则能最优地控制母线压降, 但对双向DC/DC的动态响应性能要求更高。本研究通过理论分析与仿真验证, 系统评估了不同复合电源拓扑的工作原理与性能特征, 为面向不同应用场景的超级电容器锂离子电池复合电源拓扑选型与优化设计提供了重要的理论依据和实践参考。

关键词: 超级电容器; 锂离子电池; 复合电源

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0167

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 05-1685-09

Topology analysis of supercapacitor hybrid power systems

LIU Guanglin, PU Qichan, LIU Lingling

(Guizhou Meiling Power Sources Co. Ltd, Zunyi 563000, Guizhou, China)

Abstract: To address the inherent limitations of supercapacitors in terms of energy density, voltage characteristics, and self-discharge, this study investigates the topology of hybrid power systems that combine supercapacitors with lithium-ion batteries. The aim is to enhance overall system performance by leveraging the complementary advantages of both components, thereby achieving synergistic optimization of energy and power performance to meet the demands of complex operating conditions, such as high-power pulses and frequent cycling. The study is based on physical models of supercapacitors and lithium-ion batteries. Initially, a theoretical analysis was conducted to compare their output characteristics, focusing on key parameters such as internal resistance, voltage platforms, and discharge curves. Five hybrid power system topologies integrating supercapacitors and lithium-ion batteries were systematically constructed and simulated, including a direct parallel connection, as well as

收稿日期: 2026-02-27; 修改稿日期: 2026-03-24。

第一作者及通信联系人: 刘光林 (1995—), 男, 工程师, 研究方向为锂离子电池、超级电容器等电源系统设计, E-mail: 956857874@qq.com。

引用本文: 刘光林, 蒲启婵, 刘玲玲. 超级电容器复合电源拓扑分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(5): 1685-1693.

Citation: LIU Guanglin, PU Qichan, LIU Lingling. Topology analysis of supercapacitor hybrid power systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(5): 1685-1693.

parallel connections *via* an inductor, a resistor, a DC/DC converter, and a bidirectional DC/DC converter. By establishing a simulation platform and setting pulse load conditions, a quantitative comparative analysis was performed to evaluate the dynamic response of the bus voltage under different topologies, the current distribution characteristics between the supercapacitor and the lithium-ion battery, and the energy utilization efficiency of the supercapacitor. Results indicate that the hybrid power system effectively enhances the pulse power capability of the system and extends the lifespan of the lithium-ion battery. Among the five topologies, the direct parallel and resistor-parallel configurations are structurally simple, with a pulse current distribution inversely proportional to the internal resistances of the two energy storage components. However, they suffer from significant bus voltage drops and limited utilization of the supercapacitor. The inductor-parallel topology can suppress the discharge current of the lithium-ion battery, but the inductor introduces overvoltage spikes on the bus. The DC/DC parallel topology allows precise limitation of the lithium-ion battery's output current and improves supercapacitor utilization, while the bidirectional DC/DC parallel topology optimally controls the bus voltage drop but imposes higher demands on the dynamic response performance of the bidirectional DC/DC converter. Through theoretical analysis and simulation, this study systematically evaluates the working principles and performance characteristics of different hybrid power system topologies. The study provides a solid theoretical foundation and practical guidance for the selection and optimal design of supercapacitor-lithium-ion battery hybrid power systems tailored to different application scenarios.

Keywords: supercapacitor; lithium-ion battery; hybrid power system

超级电容器也称为电化学电容器或双电层电容器,按照储能机理可分为3种,分别是双电层电容器(EDLC)、赝电容器和混合型电容器^[1]。与传统电容器相比,超级电容器利用电极与电解质界面形成的双电层和快速赝电容反应存储电荷,因此具备较高的能量密度,是传统电容器的1000倍;与锂离子电池相比,超级电容器通过物理静电吸附储存能量,而非化学氧化还原反应,因此具备较高的功率密度和超长的循环寿命,功率密度可达10 kW/kg,循环寿命高达50万次。

与传统储能元件相比,超级电容器存在能量密度较低、电压较低和自放电率较高等缺点,限制了其使用的范围。为弥补超级电容器缺点,将超级电容器与锂离子电池等能量密度较高的能源联合使用,锂离子电池用于常值小功率负载用电,超级电容器用于大功率脉冲负载用电。

许瑞等^[2]指出超级电容器与锂离子电池并联使用时,能够更好地提供电机启动时所需的大电流,有利于改善电机的启动性能。同时超级电容器具有明显的分流作用,减小了锂离子电池的放电电流,

有利于降低大电流对于锂离子电池性能的冲击。

曹云鹤等^[3]将磷酸铁锂离子电池组与超级电容器模组并联为复合电源,在-40℃低温条件下180 A放电,超级电容器放电电流最大达127 A,使得锂离子电池组的放电倍率由9.00 C降为2.65 C,解决了低温放电电压降大的问题。

乔亮波等^[4]提出了能量型储能技术与功率型储能技术组成的混合储能系统是能量管理和功率管理的高效系统,充分发挥了能量型储能的持久性和功率型储能的快速性,大幅提升储能系统的综合性能和经济性,为工况复杂的应用领域提供一种重要的解决方案。

本工作以超级电容器复合锂离子电池为例,基于两种储能元件物理模型,分析了各自输出特性;根据超级电容器与锂离子电池的输出特性,组合成5种复合电源拓扑,分析各拓扑的工作原理及优缺点。

1 性能分析

超级电容器的物理模型如图1(a)所示^[5], U_c 为

超级电容器的开路电压， R_{ES} 为超级电容器的串联内阻， R_{EP} 为超级电容器的并联阻抗，在超级电容器储存期间， R_{EP} 会以漏电流的形式损耗储存于电容的电量， R_{EP} 阻值较大，分析输出状态时，可忽略不计。超级电容器的输出电压如式(1)所示，输出功率如式(2)所示。

$$U_{out} = U_c - I_c R_{ES} \quad (1)$$

$$P_{out} = U_c I_c - I_c^2 R_{ES} \quad (2)$$

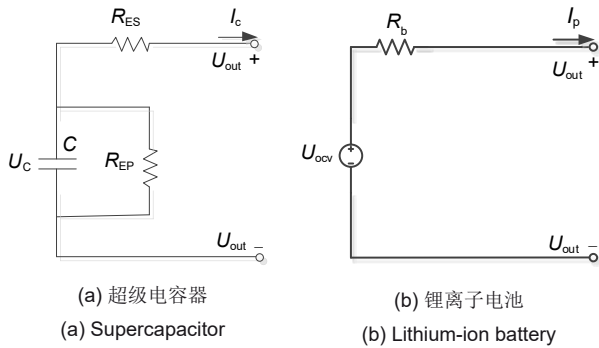


图 1 等效物理模型
Fig. 1 Equivalent physical models

锂离子电池的物理模型如图 1(b)所示， U_{OCV} 为锂离子电池的开路电压， R_b 为锂离子电池的等效内阻（欧姆内阻和极化内阻之和）。锂离子电池的输出电压如式(3)所示，输出功率如式(4)所示。

$$U_{out} = U_{OCV} - I_p R_b \quad (3)$$

$$P_{out} = U_{OCV} I_p - I_p^2 R_b \quad (4)$$

根据式(2)和式(4)可知，当锂离子电池和超级电容器开路电压（ U_c 、 U_{OCV} ）、放电电流（ I_c 、 I_p ）一致时，影响其输出状态（功率和电压）的主要因素为各储能元件的内阻。

超级电容器的内阻在 0.1~10 mΩ，主要是与电解质、隔膜和电极材料等相关的电子电阻，其阻值与超级电容器的充放电状态和寿命关联度较小，低温条件下电解质电导率会导致内阻有所增加，但是变化幅度远小于锂离子电池。锂离子电池的内阻包含了欧姆内阻、电化学极化内阻、浓度差极化内阻，其阻值为 1~500 mΩ，会随锂离子电池电量（SOC）下降、循环次数增加和温度下降而急剧升高。

超级电容器内阻远小于锂离子电池内阻，因此超级电容器功率放电性能优于锂离子电池。主要表现为：大功率脉冲放电时，超级电容器电压压降低于锂离子电池；大功率放电时，超级电容器温升低于锂离子电池。

图 2(a)为 400 F 超级电容器 1 A 放电的 SOC-V 曲线图。超级电容器放电过程电压近似线性下降，释放能量如式(5)所示，超级电容器放电前后压差越大，释放能量越多，能量利用率越高；放电前后压差越小，释放能量越少，能量利用率越低。

$$W_{out} = \frac{1}{2} C V_1^2 - \frac{1}{2} C V_2^2 \quad (5)$$

式中， V_1 为初始电压； V_2 为放电结束电压； C 为容量； W_{out} 为释放能量。

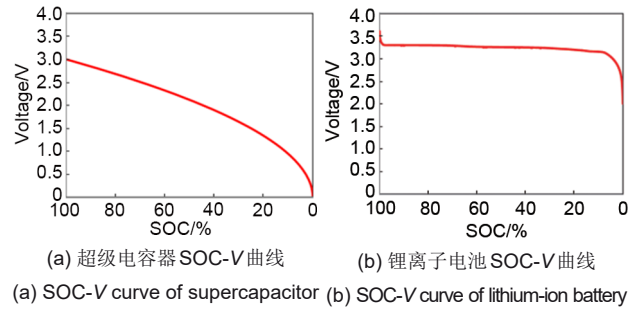


图 2 储能元件放电曲线
Fig. 2 Discharge curves of energy storage components

图 2(b)为 3.4 Ah 磷酸铁锂锂离子电池 0.2C 放电的 SOC-V 曲线。放电初期电压快速下降，放电中期在稳定电压平台区释放 80%~90% 的电量，放电末期电压急剧下降。

锂离子电池可用电压范围比较窄，超级电容器的可用电压范围比较宽，且锂离子电池的电压比超级电容器更稳定；增大超级电容器的放电电压范围，能够提升超级电容器的能量利用率。

综上可知，超级电容器的功率性能优于锂离子电池，锂离子电池的电压平台比超级电容器稳定，且能量密度远高于超级电容器。因此，在瞬时大功率、高频循环、宽温工作的应用场景中，超级电容器应作为优选；在高能量密度、长时间供能、对功率要求不极端的场景，锂离子电池仍然作为主流。

将超级电容器和锂离子电池组合成复合电源，实现功能互补，锂离子电池持续提供稳定输出，超级电容器提供脉冲功率，提升了复合电源的功率性能，延长了复合电源的使用寿命。

2 应用拓扑

超级电容器与锂离子电池复合电源设计拓扑通常为 5 种，分别是：直接并联设计、通过电感并联

设计、通过电阻并联设计、通过电源变换模块(DC/DC)并联设计和通过双向电源变换模块(双向DC/DC)并联设计,每种拓扑都存在各自的优劣势,根据不同应用场景,选择最优的拓扑进行复合电源设计。本工作将对5种超级电容器复合锂离子电池复合电源拓扑设计展开分析。

2.1 直接并联

直接并联拓扑如图3所示,将锂离子电池与超级电容器正负两端直接并联,两者电压保持一致。当负载端存在瞬时大电流脉冲负载时,锂离子电池和超级电容器根据自身内阻关系分配电流;脉冲结束后,锂离子电池给超级电容器补电。

搭建了直接并联拓扑仿真实验平台,超级电容器的容量 C 为40 F,最高电压为30.00 V,内阻 R_{ES} 为28 m Ω ,锂离子电池的容量为3.4 Ah,最高电压为29.20 V,等效内阻 R_b 为160 m Ω ;放电工况一:初始电压设置为28.00 V,脉冲电流为30.00 A,周期 T 为2 s,占空比 D 为3%;放电工况二:初始电压设置为28.00 V,脉冲电流为40.00 A,周期 T 为2 s,占空比 D 为6%。

图4为直接并联拓扑的仿真实验结果,工况一

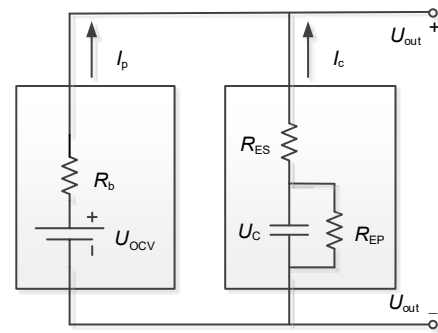


图3 直接并联拓扑

Fig. 3 Direct parallel topology

放电时,母线电压从28.00 V降至27.27 V,超级电容器放电电流 I_c 约为25.46 A,锂离子电池放电电流 I_p 约为4.54 A,脉冲放电结束后,锂离子电池以约0.3 A的电流给超级电容器补电;工况二第1个脉冲放电时,母线电压从28.00 V降至27.00 V,超级电容器放电电流 I_c 约为33.77 A,锂离子电池放电电流 I_p 约为6.23 A,脉冲放电结束后,锂离子电池以约0.5 A的电流给超级电容器补电。

唐西胜等^[6]搭建了直接并联结构的实验平台,超级电容器组的参数为200 F、0.01 Ω ,锂离子电池的参数为12 Ah、0.2 Ω ,脉冲周期为5 s,占空

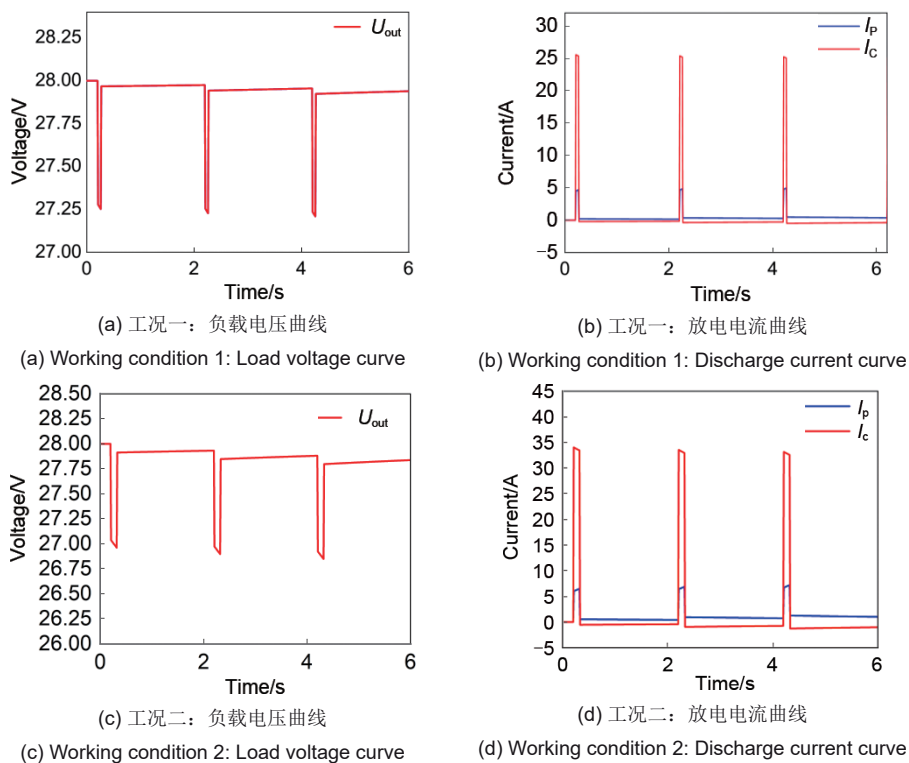


图4 直接并联脉冲放电波形

Fig. 4 Direct parallel pulsed discharge waveform diagram

比为 25%，脉动功率为 70 W。脉冲放电时，锂离子电池承担了 35% 功率，超级电容器承担了 65% 功率。该实验结果与仿真结果基本一致，脉冲放电时，超级电容器与锂离子电池之间电流的分配关系如式(6)所示。

$$\frac{I_p}{I_c} = 1 - \frac{R_b \exp\left(\frac{-DT}{(R_b + R_{ES})C}\right)}{R_b + R_{ES}} \times \frac{1 - \exp\left(\frac{-(1-D)T}{(R_b + R_{ES})C}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-T}{(R_b + R_{ES})C}\right)} \quad (6)$$

锂离子电池、超级电容器直接并联拓扑结构较为简单，可靠性较高，经济性良好，能够提升电源系统大功率脉冲功率输出能力，减缓大功率脉冲对锂离子电池的冲击，提升锂离子电池的使用寿命。但该拓扑也存在明显的缺点：一是能源利用率较低，锂离子电池电压范围为 20.00~29.20 V，超级电容器可用电压范围被锂离子电池电压钳位限制，超级电容器的可用电压范围与锂离子电池一致，因此超级电容器的利用率约为 50%；二是无法精确限制锂离子电池输出电流；三是大功率脉冲加载时，母线电压压降较大。

2.2 通过电感并联

通过电感并联拓扑如图 5 所示，基于直接并联，在锂离子电池和超级电容器中间匹配一个电感，电感能够抑制锂离子电池的输出电流突变，降低脉冲电流对锂离子电池的冲击，强化超级电容器在大功率脉冲放电时的作用。

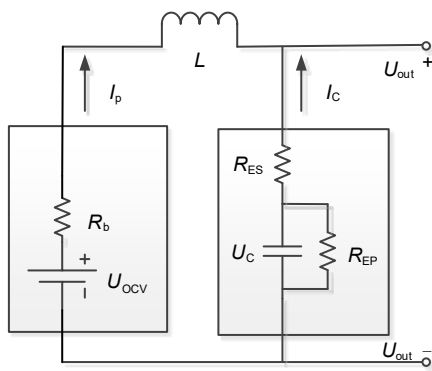
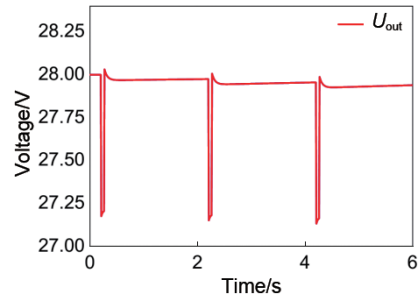


图 5 通过电感并联拓扑

Fig. 5 Inductor-connected parallel topology

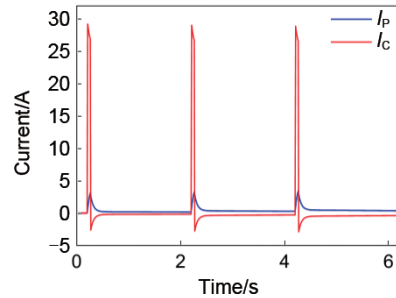
在直接并联仿真平台的基础上，锂离子电池后端串联 10 mH 的电感。图 6 为该拓扑的仿真实验结果，工况一放电时，母线电压从 28.00 V 降至 27.17 V，超级电容器平均放电电流 I_c 约为 27.93 A，锂离子电池放电电流 I_p 约为 2.07 A；工况

二放电时，母线电压从 28.00 V 降至 26.90 V，超级电容器平均放电电流 I_c 约为 38.83 A，锂离子电池放电电流 I_p 约为 1.17 A。



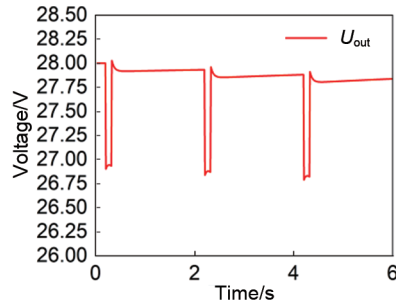
(a) 工况一：负载电压曲线

(a) Working condition 1: Load voltage curve



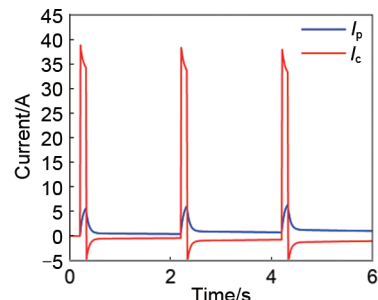
(b) 工况一：放电电流曲线；

(b) Working condition 1: Discharge current curve



(c) 工况二：负载电压曲线

(c) Working condition 2: Load voltage curve



(d) 工况二：放电电流曲线

(d) Working condition 2: Discharge current curve

图 6 通过电感并联脉冲放电波形
Fig. 6 Pulse discharge waveform diagram of inductor parallel topology

通过电感并联拓扑能抑制锂离子电池的输出电流,降低大功率脉冲电流对锂离子电池的电应力冲击;但是在大功率脉冲负载卸载时,电感自身磁场能量释放产生的瞬态电压,导致母线电压出现电压过压尖峰,影响母线电源品质。

2.3 通过电阻并联

通过电阻并联拓扑如图7所示,在锂离子电池和超级电容器中间匹配一个电阻,降低锂离子电池的放电能力,强化超级电容器在大功率脉冲放电时的作用。

在直接并联仿真平台的基础上,锂离子电池后

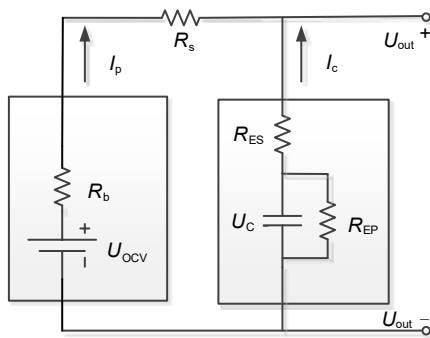
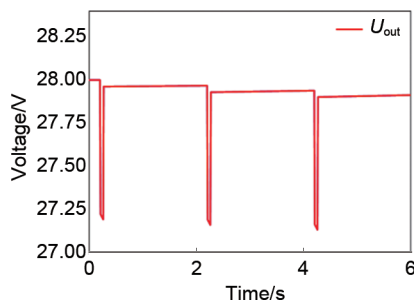


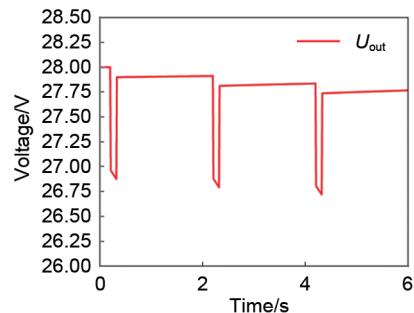
图7 通过电阻并联拓扑

Fig. 7 Resistor-connected parallel topology



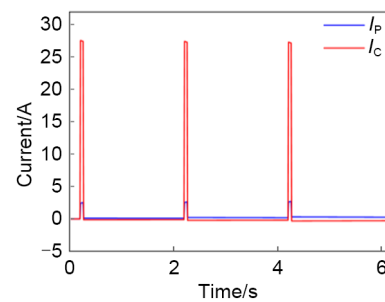
(a) 工况一: 负载电压曲线

(a) Working condition 1: Load voltage curve



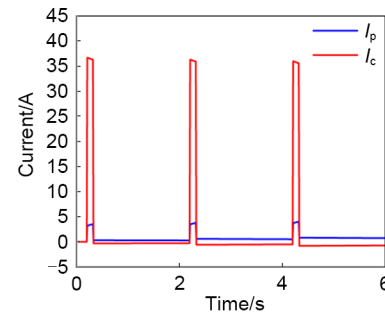
(c) 工况二: 负载电压曲线

(c) Working condition 2: Load voltage curve



(b) 工况一: 放电电流曲线;

(b) Working condition 1: Discharge current curve



(d) 工况二: 放电电流曲线

(d) Working condition 2: Discharge current curve

图8 通过电阻并联脉冲放电波形

Fig. 8 Pulse discharge waveform diagram of resistor-connected parallel topology

端串联 $160\text{ m}\Omega$ 的电阻。图8为该拓扑的仿真实验结果,工况一放电时,母线电压从 28.00 V 降至 27.22 V , 超级电容器平均放电电流 I_c 约为 27.52 A , 锂离子电池放电电流 I_p 约为 2.48 A ; 工况二放电时,母线电压从 28.00 V 降至 26.96 V , 超级电容器输出电流 I_c 为 36.71 A , 锂离子电池稳定输出电流 I_p 约 3.29 A 。

通过电阻并联拓扑能进一步抑制锂离子电池的输出电流,降低大功率脉冲电流对锂离子电池的电应力冲击;但是,大功率脉冲加载时,母线电压压降比直接并联拓扑更大。

2.4 通过DC/DC并联

通过DC/DC并联拓扑如图9所示,锂离子电池经过DC/DC后,再与超级电容器并联输出,DC/DC工作模式为限流恒压模式,通过设置DC/DC的限流值精确控制锂离子电池的输出电流。

在直接并联仿真平台的基础上,锂离子电池后端串联DC/DC,DC/DC的限流值设置为 1 A , 恒压值设置为 28.00 V 。图10为该拓扑的仿真实验结果,工况一放电时,母线电压从 28.00 V 降至 27.12 V , 超级电容器输出电流 I_c 为 29.10 A , 锂离子

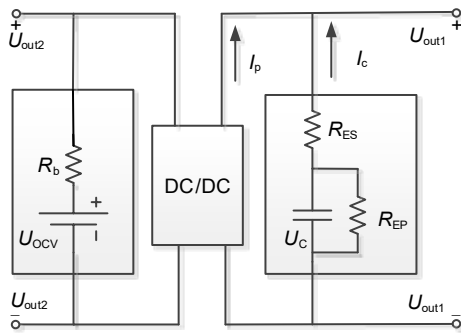


图 9 通过 DC/DC 并联拓扑

Fig. 9 Parallel topology via DC/DC converter

子电池稳定输出电流 I_p 约 1.01 A；工况二放电时，母线电压从 28.00 V 降至 26.90 V，超级电容器输出电流 I_c 为 39.22 A，锂离子电池稳定输出电流 I_p 约 1.02 A。

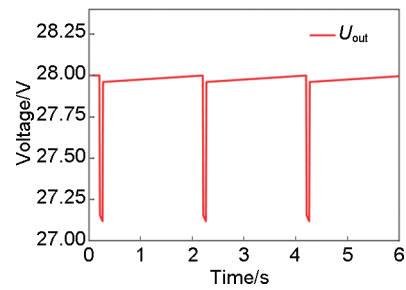
该拓扑的优点是可通过 DC/DC 精确调整锂离子电池的最大输出电流，精确限制大功率脉冲电流对锂离子电池的电应力冲击；同时，提高了超级电容器的利用率，超级电容器可用电压范围与负载用电电压范围一致，若负载可用电压范围为 9.00~30.00 V，超级电容器利用率可达 91%。

但是，大功率脉冲加载时，母线电压压降比直接并联拓扑更大；且受 DC/DC 转化效率影响，系统输出效率下降，约为 80%~95%。为优化该问题，若恒功率与大功率脉冲为不同负载时，复合电源可设计为两种输出接口，瞬时大功率输出接口由超级电容器引出，如图 9 中 U_{out1} 所示；恒功率输出接口由电池端直接引出，如图 9 中 U_{out2} 所示。

2.5 通过双向 DC/DC 并联

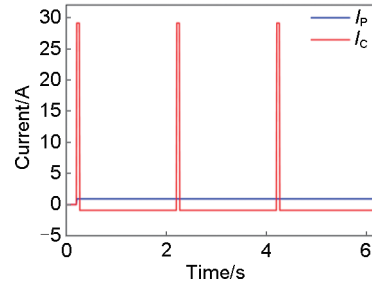
通过双向 DC/DC 并联拓扑如图 11 所示，超级电容器通过双向 DC/DC 后和锂离子电池并联输出，双向 DC/DC 动态监控母线电压，当母线电压低于设定电压后，双向 DC/DC 吸收超级电容器的电量给母线补电，避免母线电压被负载拉低；当母线电压高于设定电压后，且超级电容电压过低时，双向 DC/DC 吸收母线能量给超级电容器进行充电。

在直接并联仿真平台的基础上，超级电容后端串联双向 DC/DC，当母线电压低于 27.6 V 时，电流从超级电容器经双向 DC/DC 后流向母线，避免母线电压被拉低；当母线电压大于 27.8 V，且超级电容器电压低于 28 V 时，电流从母线经双向 DC/DC 后流向超级电容器补电，电流限流 1 A。



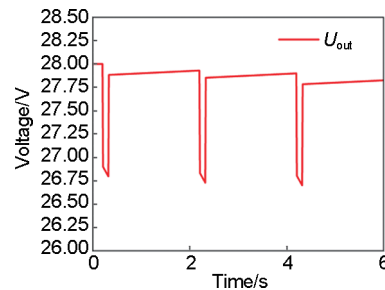
(a) 工况一：负载电压曲线

(a) Working condition 1: Load voltage curve



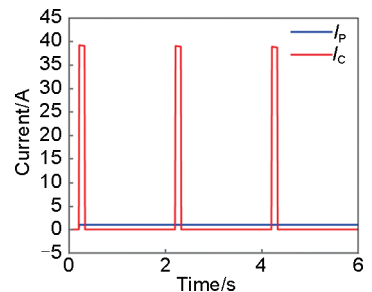
(b) 工况一：放电电流曲线；

(b) Working condition 1: Discharge current curve



(c) 工况二：负载电压曲线

(c) Working condition 2: Load voltage curve



(d) 工况二：放电电流曲线

(d) Working condition 2: Discharge current curve

图 10 通过 DC/DC 并联脉冲放电波形

Fig. 10 Pulse discharge waveform diagram of DC/DC parallel topology

图 12 为该拓扑结构的仿真实验结果，工况一放电时，超级电容器电压从 28 V 下降至 27.09 V，母线电压仅降至 27.60 V，双向 DC/DC 输出电流 I_c 为 27.52 A，锂离子电池稳定输出电流 I_p 约 2.45 A；工况

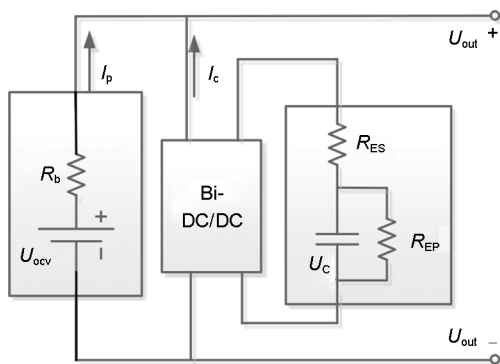


图11 通过双向DC/DC并联拓扑
Fig. 11 Parallel topology via bidirectional DC/DC converter

二放电时, 超级电容器电压从 28 V 下降至 26.78 V, 母线电压仅降至 27.50 V, 双向DC/DC输出电流 I_c 为 37.59 A, 锂离子电池稳定输出电流 I_p 约 2.48 A。

该拓扑的优点是超级电容器的可用电压范围变宽, 提升了超级电容器的利用率; 大功率脉冲加载时, 母线压降范围较小且可控。但是, 该拓扑对双向DC/DC功率性能、响应速度要求较高; 且受双向DCDC转化效率影响, 脉冲输出效率下降, 为 80%~95%。

3 结论

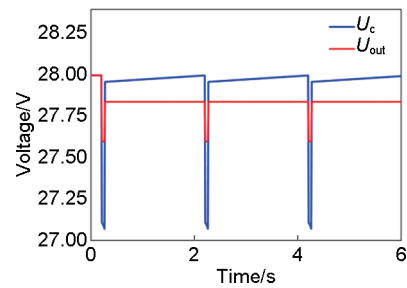
基于超级电容器和锂离子电池的物理模型, 分析了超级电容器和锂离子电池的输出特性, 对超级电容器锂离子电池复合电源拓扑进行了仿真, 得到如下结论:

(1) 超级电容器功率密度较高, 锂离子电池能量密度较高, 将超级电容器和锂离子电池组合形成复合电源实现功能互补, 可以提升功率放电性能, 延长整体使用寿命。

(2) 超级电容器锂离子电池直接并联、通过电阻并联拓扑, 脉冲放电电流与两种储能元件的内阻大小成反比。

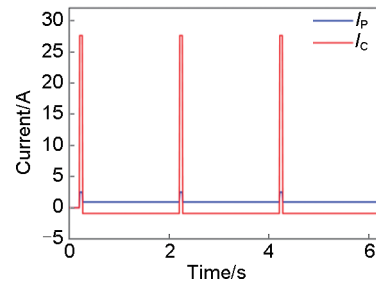
(3) 超级电容器锂离子电池通过电感并联拓扑, 抑制锂离子电池的输出电流, 脉冲放电时, 母线存在电压过压尖峰, 影响母线电源品质。

(4) 超级电容器锂离子电池通过电源变换模块(DC/DC)并联拓扑, 脉冲放电时, 可精确控制锂离子电池的输出电流, 拓宽超级电容器的可用电压范围。



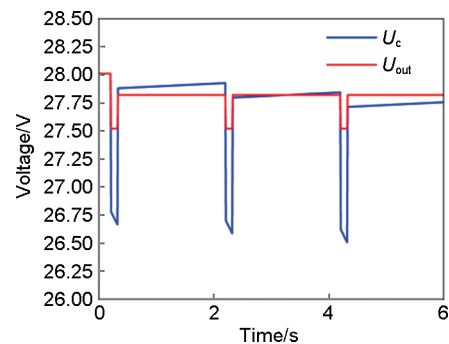
(a) 工况一: 负载电压曲线

(a) Working condition 1: Load voltage curve



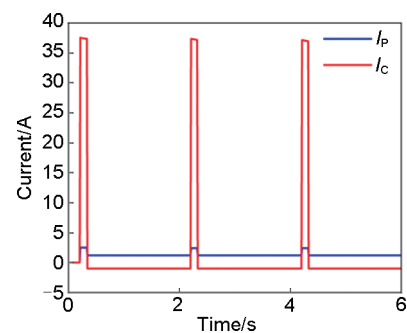
(b) 工况一: 放电电流曲线;

(b) Working condition 1: Discharge current curve



(c) 工况二: 负载电压曲线

(c) Working condition 2: Load voltage curve



(d) 工况二: 放电电流曲线

(d) Working condition 2: Discharge current curve

图12 通过双向DC/DC并联脉冲放电波形
Fig. 12 Pulse discharge waveform diagram for parallel topology via bidirectional DC/DC converter

(5) 超级电容器锂离子电池通过双向电源变换模块(双向DC/DC)并联拓扑, 脉冲放电时, 可

精确控制母线压降大小，提升母线电压稳定性。

参考文献

- [1] 陈雪丹, 陈硕翼, 乔志军, 等. 超级电容器的应用[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(6): 799-805. DOI: 10.12028/j. issn. 2095-4239.2016.0047.
CHEN X D, CHEN S Y, QIAO Z J, et al. Applications of supercapacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(6): 799-805. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2016.0047.
- [2] 许瑞, 韩昌隆, 付成华, 等. 超级电容器对电池脉冲放电有益作用的研究[J]. 电源技术, 2012, 36(2): 212-214. DOI: 10.3969/j. issn.1002-087X.2012.02.021.
XU R, HAN C L, FU C H, et al. Study of EDLC benefit on battery pulse discharge[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(2): 212-214. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2012.02.021.
- [3] 曹云鹤, 王畅, 吕树铎, 等. 锂离子电池与超级电容器复合的低温启动性能[J]. 电池, 2024, 54(1): 86-88. DOI: 10.19535/j. 1001-1579.2024.01.019.
CAO Y H, WANG C, LÜ S D, et al. Low-temperature start performance of Li-ion battery composited with supercapacitor[J]. Battery Bimonthly, 2024, 54(1): 86-88. DOI: 10.19535/j. 1001-1579.2024.01.019.
- [4] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98-106. DOI: 10.19799/j. cnki.2095-4239.2021.0229.
QIAO L B, ZHANG X H, SUN X Z, et al. Advances in battery-supercapacitor hybrid energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 98-106. DOI: 10.19799/j. cnki.2095-4239.2021.0229.
- [5] SPYKER R L, NELMS R M. Double layer capacitor/DC-DC converter system applied to constant power loads[C]// Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. IEEE, 2002: 255-259. DOI: 10.1109/IECEC.1996.552880.
- [6] 唐西胜, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合电源[J]. 电源技术, 2006, 30(11): 933-936.
TANG X S, QI Z P. Study on the ultracapacitor/battery hybrid system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(11): 933-936.