

# 应用于混合储能组合级联式多端口变流器拓扑结构研究

田明杰<sup>1</sup>, 吴俊勇<sup>1</sup>, 熊飞<sup>1</sup>, 艾洪克<sup>1</sup>, 郝亮亮<sup>1</sup>, 张巨瑞<sup>2</sup>, 张皎<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 北京京能清洁能源电力股份有限公司, 北京 100028;  
3. 北京科锐博润电力电子有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对光伏等可再生能源发电的间歇性和功率波动问题, 提出一种新型的用于混合储能的组合级联式隔离型多端口变流器拓扑结构及其控制策略。该装置由蓄电池组、超级电容器组、多端口隔离半桥DC/DC变换器和级联式H桥DC/AC变换器组合而成。首先对该拓扑的工作原理进行了分析; 然后结合相应的控制策略, 通过滑动平均滤波算法将外界给定目标功率指令在各储能单元之间进行合理分配, 并在PLECS上搭建了基于该装置的光伏电站并网模型进行仿真; 最后, 结合仿真结果和实际工程案例对该装置可带来的经济效益进行了定量分析。结果表明, 所提出的混合储能拓扑结构可有效结合超级电容器功率密度高、响应速度快, 和蓄电池能量密度高、适用于平抑长周期缓慢功率波动的特点, 提高了间歇式电源并网运行的电能质量和可调度性, 同时避免了蓄电池频繁充放电, 显著延长了电池使用寿命。该装置可用于基于蓄电池-超级电容器混合储能(BSHES)的大功率储能电站, 实现平滑可再生能源发电输出功率波动和微电网中的调频调压功能, 模块集成度高, 可实现模块化生产, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 光伏电站; 混合储能; 多端口变流器; 锂电池-超级电容器混合储能(BSHES); 大功率储能电站; 经济效益分析

## Research on combination of cascaded multiport converter topology in hybrid energy storage

TIAN Ming-jie<sup>1</sup>, WU Jun-yong<sup>1</sup>, XIONG Fei<sup>1</sup>, AI Hong-ke<sup>1</sup>, HAO Liang-liang<sup>1</sup>, ZHANG Ju-ru<sup>2</sup>, ZHANG Jiao<sup>3</sup>

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Jingneng Clean Energy Co., Limited, Beijing 100028, China;  
3. Creat-Poreen Power Electronics Co.,Ltd, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For the photovoltaic and intermittent energy power generation power fluctuation, this paper presents a novel multiport isolated converter topology and its control strategy of combination cascade type for hybrid energy storage. The device consists of battery packs, super capacitor packs, multiport isolated half-bridge DC/DC converter and cascaded H-bridge DC/AC converter. The working principle of this topology is analyzed, and then combined the corresponding control strategy, through the sliding average filter algorithm, the outside given power instructions will be in all storage allocation units; and finally, this paper makes a quantitative analysis on economic benefits of the device based on the simulation results and the actual project data. The results of simulation show that the proposed topology can be effectively combined with the characteristics of super capacitor of high power density, fast response speed and battery applied to stabilize the long periodic slow power fluctuation, improving the operation of intermittent power grid power quality and dispatchableability, while avoiding the battery charge and discharge frequently. The device can be used for high power energy storage power station based on battery and super-capacitor hybrid energy storage (BSHES), to realize the function of smoothing renewable energy power generation output power and frequency or voltage modulation in the micro grid; each module can realize high integration degree and modular production, so it has a broad application prospect.

**Key words:** photovoltaic power station; hybrid energy storage; multi port converters; battery and super-capacitor hybrid energy storage (BSHES); high power energy storage power station; economic benefit analysis

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0081-09

## 0 引言

近年来, 随着传统能源的日益枯竭和人们环保意识的增强, 可再生能源发电得到了越来越多的应

用。由于光伏等可再生能源所具有的间歇性和随机性特点, 大量并网会对电网的安全稳定及电能质量带来影响<sup>[1]</sup>。储能作为一种可调度资源应用于电力系统, 能够很好地解决这一问题<sup>[2-3]</sup>。

现有储能装置的储能载体主要采用蓄电池和超

基金项目: 北京市科技计划课题资助项目(D131104002013003)

级电容器两种。蓄电池的能量密度较高，但功率密度小，不适用大功率充放电和频繁充放电等场合<sup>[4]</sup>；而超级电容器则相反，其响应速度快、大功率输出能力强、循环使用寿命长，但能量密度较低<sup>[5-6]</sup>。将蓄电池和超级电容器混合使用，具有较大的技术经济优势，是平抑系统功率波动的有效手段。

近些年，对蓄电池—超级电容器混合储能(Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage, BSHES)在电动汽车上应用的研究比较广泛<sup>[7]</sup>。由于BSHES的性能特点，在面向间歇式分布式电源的应用方面，国内外也已经出现了一些理论研究和模型测试<sup>[8-10]</sup>。将BSHES应用于配电系统，现已成为研究热点，而蓄电池和超级电容的接入方式是其中的一个重点研究内容。文献[11]介绍了几种蓄电池和超级电容器并入电网的接入方式，并分析了各自的特点，从中可以看出，寻找一种高效、简单的多端口DC/DC变换器是关键。目前，蓄电池和超级电容器常规的并网接入方式是将两者通过变换器并联或直接并联，然后接入直流母线，再通过逆变器并入电网。文献[12]研究了一种通过两个双向DC/DC变换器将两者接入直流母线的拓扑结构，此种结构虽然能起到延长蓄电池使用寿命，提高混合储能系统的最大功率输出能力等作用，但存在调节功率小、不能实现蓄电池、超级电容器低压侧与电网高压侧电气隔离等缺点。文献[13]分析了一种分别将蓄电池、超级电容器通过DC/DC、DC/AC接入电网的拓扑结构，这种结构能够实现蓄电池和超级电容能量的完全解耦，控制比较灵活，但其存在所用变换器较多、结构集成度低等缺点，极大地限制了混合储能技术的推广利用。

本文在已有混合储能系统结构的基础上，提出一种新型的用于混合储能的组合级联式双向隔离型多端口变流器拓扑结构，如图1所示。它由蓄电池组、超级电容器组、多端口隔离半桥DC/DC变换器和级联式H桥DC/AC变换器组合而成，能够进行高压大功率的双向功率变换。多端口DC/DC变换器能够实现不同电压等级电源的输入，降低了对蓄电池、超级电容器端电压的要求，且各输入端口能量完全解耦，可独立均衡控制。另外，该多端口DC/DC变换器输入端口 $n$ 可以根据实际需要进行设定。DC/AC变换器交流侧采用级联式拓扑并网（级联数为 $k$ ），其电平数高，谐波特性好，适合模块化设计。文中首先对该拓扑的工作原理进行了分析；然后在PLECS上搭建了基于该装置的光伏电站并网模型，并结合相应的控制策略进行了仿真；最后，本文又结

合仿真结果和实际工程项目数据对该装置可带来的经济效益进行了定量分析。通过仿真算例分析，验证了所提拓扑能够实现延长蓄电池使用寿命，降低储能电站运行周期成本的功能。

## 1 拓扑结构及工作原理

### 1.1 系统拓扑结构

图1为本文提出的组合级联式隔离型多端口变流器拓扑结构。以A相为例，该结构由多端口隔离型半桥DC/DC变换器和级联式H桥DC/AC变换器两部分组成。蓄电池组和超级电容器组通过多端口DC/DC变换器与级联H桥的直流侧电容 $C_0$ 并联，各相经连接电抗 $L_s$ 和启动电阻 $R_s$ 接入交流电网。多端口DC/DC变换器实现不同电压等级的蓄电池组和超级电容器组的接入；通过移相控制，实现功率的双向传输；DC/AC变换器可实现装置的有功功率和无功功率的独立控制<sup>[14]</sup>。

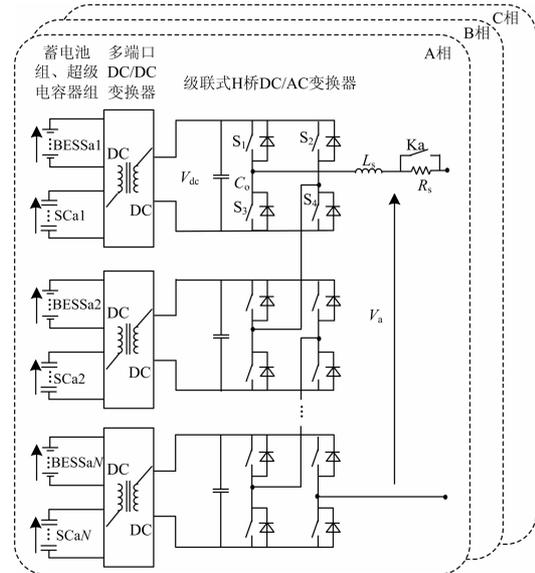


图1 组合级联式隔离型多端口变流器拓扑结构

Fig. 1 Combination of cascaded isolated multiport converter topologies structure

对于高压大功率的蓄电池组、超级电容器组混合储能系统，级联式H桥可直接与10 kV以上的高压交流电网相连。图2为该装置的并网结构图，其中装置并网级联数 $k=9$ 。为了避免蓄电池、超级电容器低压侧系统在高电位下运行，发生电离放电，DC/DC变换器须通过高频变压器实现交流电网与低压侧系统的电气隔离。DC/AC侧的级联式H桥利用多重化技术输出高压侧交流电压波形，降低了对输入电压等级的要求，交流侧

可直接并网, 省去了并网工频变压器。

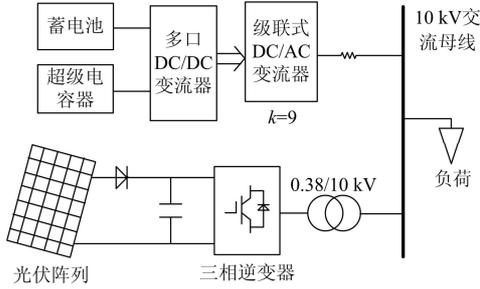


图 2 装置并网结构图

Fig. 2 Structure of the device on-line

### 1.2 多端口 DC/DC 变换器结构及工作原理

图 3 (a) 是  $n=2$  的多端口隔离型半桥 DC/DC 变换器的基本拓扑。主要元件有开关器件  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ , 分压电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ , 电源滤波电感  $L_{11}$ 、 $L_{12}$ , 储能电感  $L_k$ ,  $L_k$  代表原边外接电感与变压器漏感之和。 $n=N$  的多端口隔离型半桥 DC/DC 变换器变形拓扑如图 3 (b) 所示。

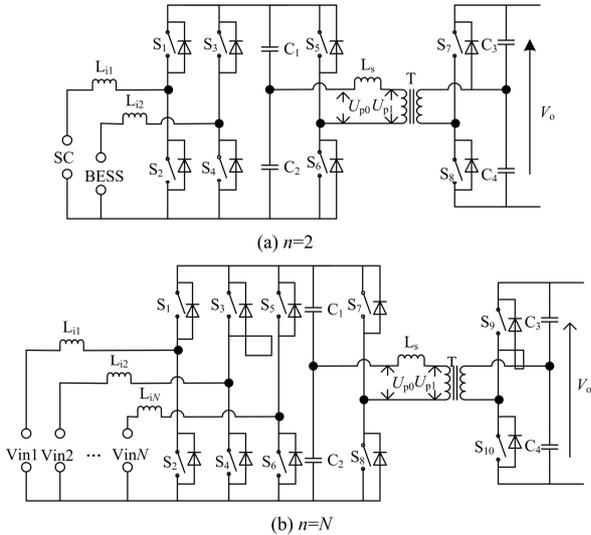


图 3 多端口隔离半桥 DC/DC 变换器的基本结构和变形拓扑

Fig. 3 Basic topology and its variability of multi port isolated half-bridge DC/DC converter

如图 3 (a) 所示, 多端口 DC/DC 变换器的基本工作原理是控制  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  的通断, 将电压等级不同的蓄电池、超级电容器端口的能量传递到隔离变压器 T 一次侧直流母线上, 同时通过恒压控制策略, 维持一次侧直流母线电压  $V_{o1}$  恒定。控制  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$  的通断, 通过移相控制方式, 改变变压器两侧桥臂触发信号超前或滞后的相位关系, 可以改变传输功率的方向; 而改变变压器两侧桥臂触发信号移相角的大小, 可以改变

蓄电池、超级电容器侧的输出功率大小; 通过移相控制, 也可维持隔离变压器 T 二次侧直流母线电压  $V_{o2}$  稳定, 从而保证 DC/AC 变换器正常运行。

下面对多端口隔离半桥 DC/DC 变换器进行稳态分析。

图 4 为多端口 DC/DC 变换器工作在输出功率模式下一个周期内 ( $t_0 \sim t_8$ ) 开关管  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$  的驱动信号及关键部件电压电流波形。图中  $V_1$ 、 $V_2$  分别为  $C_1$ 、 $C_2$  上的电压,  $V_3'$ 、 $V_4'$  分别为  $C_3$ 、 $C_4$  上电压变换到变压器一次侧的电压,  $D$  为开关管  $S_5$ 、 $S_7$  的占空比,  $\phi$  为开关管  $S_5$  超前  $S_7$  的相角。为使开关管  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$  的电压应力相同, 同时使电容  $C_1$ 、 $C_2$  及  $C_3$ 、 $C_4$  上电压相等(即  $V_1 = V_2$ ,  $V_3 = V_4$ ), 可设定占空比  $D=0.5$ 。  $N_p$ 、 $N_s$  为隔离变压器原副边线圈匝数, 且  $N_p:N_s = 1:1$ ,  $V_{Lk}$ 、 $I_{Lk}$  为储能电感  $L_k$  上电压、电流。

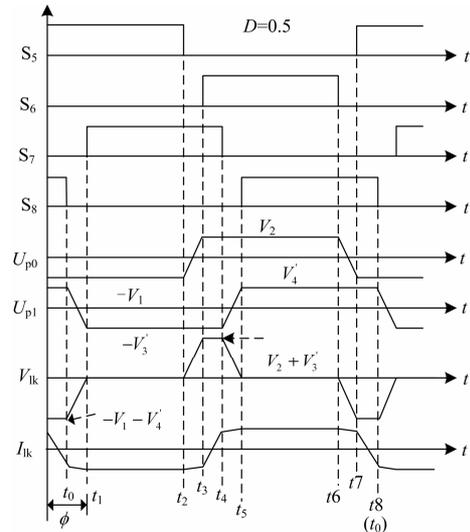


图 4 开关驱动信号及关键部件典型电压电流波形

Fig. 4 Switch driving signal and typical voltage and current waveforms for key components

对储能电感和隔离变压器列伏秒平衡方程:

$$-V_1(\phi + 2\pi D - \phi) + V_2[\phi + 2\pi(1 - D) - \phi] = 0 \quad (1)$$

$$-V_3'(\phi + 2\pi D - \phi) + V_4'[\phi + 2\pi(1 - D) - \phi] = 0 \quad (2)$$

由式 (1)、式 (2) 得

$$V_1 = \frac{1-D}{D} \cdot V_2 \quad (3)$$

$$V_3' = \frac{1-D}{D} \cdot V_4' \quad (4)$$

通过移相控制, 可保证装置在电压匹配情况下运行。所谓电压匹配, 即  $U_{p0}$ 、 $U_{p1}$  的电压满足:



基本结构可以看出, 蓄电池组、超级电容器组输入端的能量通过  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$ 、 $S_4$  组成的两个半桥桥臂传递到隔离变压器一次侧直流母线, 然后通过移相控制将一次侧直流母线上的能量通过隔离变压器 T 传递到二次侧直流母线, 为了使装置正常运行, 必须维持一次侧、二次侧直流母线电压  $V_{o1}$ 、 $V_{o2}$  稳定。

为了将外界参考功率指令  $P_{ref}$  中高频和低频功率波动分离, 该系统采用滑动平均滤波算法分配混合储能系统功率, 由蓄电池承担低频功率波动, 超级电容器承担高频功率波动<sup>[18]</sup>。电池输出功率为

$$P_{bess\_ref}(t) = \begin{cases} \frac{\int_0^t P_{ref}(t') dt'}{t} & t < T \\ \frac{\int_{t-T}^t P_{ref}(t') dt'}{T} & t \geq T \end{cases} \quad (9)$$

超级电容器输出功率为

$$P_{sc}(t) = P_{ref}(t) - P_{bess\_ref}(t) \quad (10)$$

式中,  $T$  为滑动平均滤波时间常数。

将  $P_{ref}$  中提取的低频分量  $P_{bess\_ref}$  除以蓄电池端电压作为蓄电池端口恒流控制的参考指令  $I_{bess\_ref}$ 。如图 7 (a), 通过恒流控制, 调节开关管  $S_3$ 、 $S_4$ , 使蓄电池端口实时跟踪  $P_{ref}$  中长期缓慢的低频功率波动。目标参考功率指令  $P_{ref}$  与低频分量  $P_{bess\_ref}$  的差值 (高频功率波动) 由超级电容器端口补偿, 如图 7 (b), 通过恒压控制, 调节开关管  $S_1$ 、 $S_2$  维持  $V_{o1}$  恒定, 从而使超级电容器端口跟随  $P_{ref}$  中的高频功率波动。外界参考功率指令  $P_{ref}$  的变化会反映为隔离变压器二次侧直流母线电压  $V_{o2}$  的波动, 如图 7 (c),

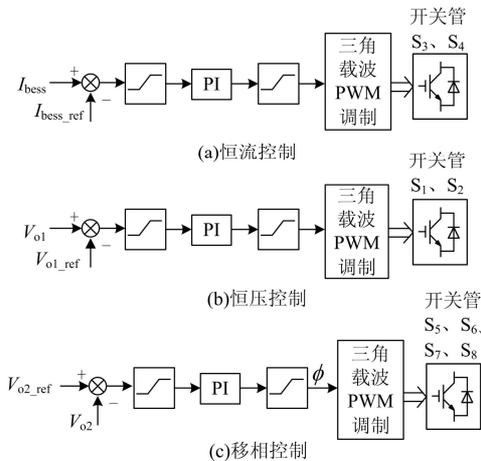


图 7 DC/DC 变流器控制框图

Fig. 7 Block diagram of DC / DC converter control

通过移相控制调节开关管  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$  来维持  $V_{o2}$  稳定, 从而达到蓄电池和超级电容器与交流电网传递的功率保持动态平衡。

### 3 仿真实验分析

本文在 PLECS 仿真环境下建立了基于锂电池、超级电容器混合储能的组合级联式功率转换系统模型, 装置的并网系统结构如图 2 所示。为验证本文所提拓扑及控制策略的有效性, 对装置平抑光伏电站功率波动的系统模型进行了仿真, 并结合仿真结果和实际工程项目数据, 对该混合储能装置延长锂电池使用寿命所带来的经济效益进行了定量分析。

#### 3.1 仿真参数

该系统中光伏电站装机容量为 12 MW·h, 混合储能装置设计的最大调节功率为  $\pm 2.2$  MW, 其中蓄电池最大调解功率为  $\pm 1$  MW, 超级电容器最大调节功率为  $\pm 1.2$  MW, 只调节有功功率, 无功功率为零。交流电网侧线电压 10 kV, DC/AC 变换器每相 H 桥级联数  $k=9$ , 开关频率为 2 kHz, 采用星型接线。DC/DC 变换器采用  $n=2$  的双端口输入基本拓扑结构, 开关频率 20 kHz, 高频变压器变比  $T$  为 1:3。电感参数  $L_{11}=L_{12}=1$  mH,  $L_k=20$   $\mu$ H, 电容参数  $C_1=C_2=4$  mF,  $C_o=5$  mF,  $C_3=C_4=10$  mF, 超级电容器组额定电压为 180 V, 蓄电池组额定电压也为 180 V, 隔离变压器一次侧直流母线电压目标值  $V_{o1}=360$  V, 二次侧直流母线电压目标值  $V_{o2}=1080$  V。装置启动电阻  $R_s=50$   $\Omega$ , 连接电抗  $L_s=4$  mH。其中仿真时间 0.3~2.1 s, 模拟一天白昼时间 05~18 时。

#### 3.2 仿真结果

图 8 为该系统模型某日光伏电站平抑前后的功率输出曲线。其中  $P_{v\_ref}$  为外界调度给定目标功率输出指令;  $P_v$  为光伏电站实际功率输出, 其数据来源于文献[19], 并结合该仿真系统进行了合理修改。由图可以看出, 该混合储能装置能很好地平抑光伏电站发出功率的波动, 从而减小了其并网后给电网带来的冲击, 改善了电能质量。

图 9 (a)、(b) 分别为装置目标功率指令  $P_{ref}$  和装置实际功率输出  $P_{total}$  的波形, 由图可以看出, 装置实际输出功率  $P_{total}$  可快速响应目标功率指令  $P_{ref}$ ; 图 9 (c)、(d) 分别为蓄电池发出功率  $P_{bess}$  及超级电容器发出功率  $P_{sc}$  的波形, 可以看出, 蓄电池的输出功率曲线变化比较平缓, 调节功率在  $\pm 1$  MW 以内; 而超级电容器的输出功率曲线波动较剧烈, 调节功率在  $\pm 1.2$  MW 以内。由此验证了本文所采用

的滑动平均滤波法及相关控制策略的有效性。

图 10 (a)、(b) 分别为隔离变压器一、二次侧直流母线电压。由图可以看出, 一次侧直流母线电压  $V_{o1}$  基本维持在目标值 360 V 左右, 而二次侧直流母线电压  $V_{o2}$  随外界功率指令的变化在目标值 1 080 V 上下小幅度波动。一、二次侧直流母线电

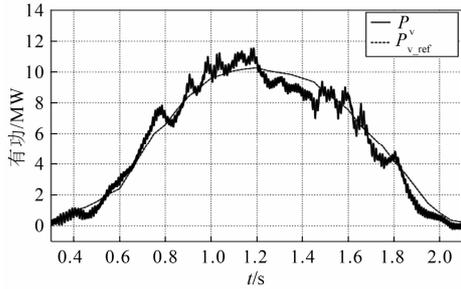


图 8 光伏电站平抑前后功率输出波形

Fig. 8 Power output waveform of photovoltaic power station before and after smoothing

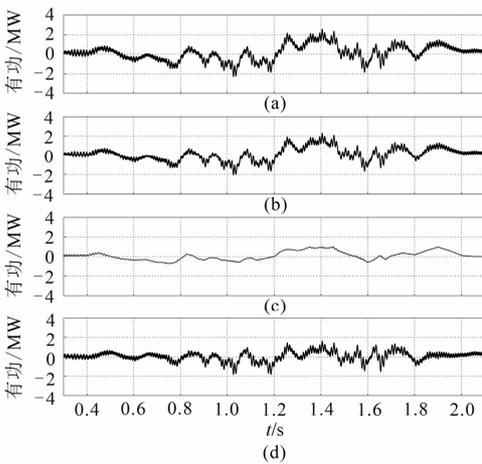


图 9 装置及各部分功率输出波形

Fig. 9 The power output waveform of the device and parts

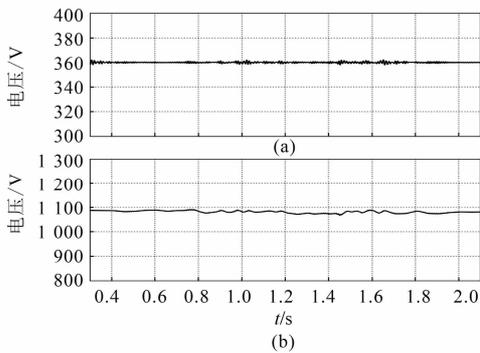


图 10 变压器一、二次侧直流母线电压波形

Fig. 10 DC bus voltage waveform of the primary side and secondary side of the transformer

压的稳定, 保证了装置持续正常的运行。

图 11 为仿真过程中单个 DC/DC 变换器移相角的动态变化, 由图示可知, 移相角的调节范围在  $\pm 60^\circ$  之间, 其变化趋势与装置发出功率变化趋势相同。移相角为负时, 装置吸收功率, 移相角为正时, 装置发出功率。

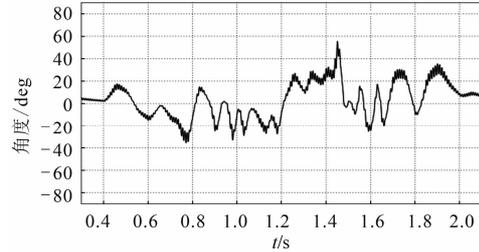


图 11 移相角动态变化波形

Fig. 11 Dynamic waveform of the phase angle

图 12、图 13 分别为装置输出和吸收功率时电压  $U_{p0}$ 、 $U_{p1}$  及电流  $I_{Lk}$  的匹配波形。可以看出, 装置输出功率时  $U_{p0}$  相位超前  $U_{p1}$ , 移相角为正, 吸收功率时则相反; 装置运行过程中电压  $U_{p0}$ 、 $U_{p1}$  大致匹配。

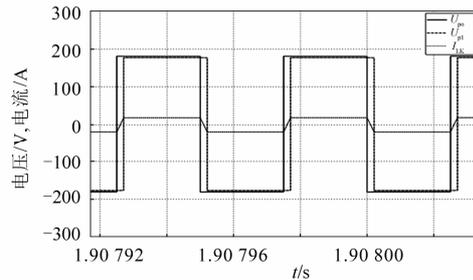


图 12 输出功率时  $L_k$  两侧电压电流匹配波形

Fig. 12 Voltage and current waveform matching with both sides of the  $L_k$  when output power

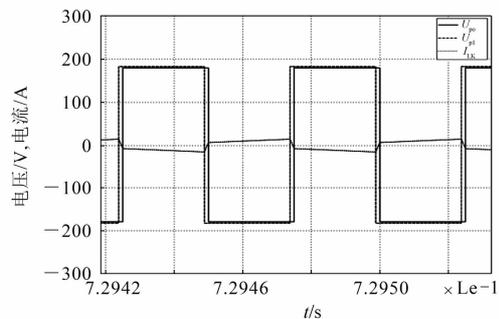


图 13 吸收功率时  $L_k$  两侧电压电流匹配波形

Fig. 13 Voltage and current waveform matching with both sides of the  $L_k$  when absorption power

### 3.3 经济效益分析

经济效益分析一般要进行两方面的成本分析, 即投资安装成本和运行成本。投资安装成本涉及到

蓄电池、超级电容的容量最优配置, 本文结合仿真结果和实际工程项目数据, 对它们进行定量分析。

运行成本分析的关键是对蓄电池和超级电容器循环寿命的计算。由于超级电容器的循环寿命长达10年以上, 循环寿命高达50万~100万次<sup>[20]</sup>, 远高于蓄电池的寿命, 在使用过程中的平均成本很低, 因此可将超级电容器的循环寿命设为常数。下面重点分析蓄电池循环寿命的计算方法。

蓄电池的循环寿命受诸多因素影响, 例如温度、峰值电流、放电深度(Depth of discharge,  $Dod$ )以及充放电次数等。为简化分析, 仅考虑充放电次数和放电深度对蓄电池循环寿命的影响。当蓄电池工作时, 每经受一次全充电和全放电过程称为一个循环。蓄电池除了发生的充放电大循环外, 还会由于自然条件的影响每天发生数次充放电小循环, 如日照强度和环境温度的变化等。频繁发生充放电小循环, 也会导致蓄电池寿命的缩短。

蓄电池的循环寿命在很大范围内与 $Dod$ 呈近似线性关系, 如图14所示。 $Dod$ 越大, 蓄电池的循环寿命越短。另外, 从器件的失效进程上看, 蓄电池发生3次 $Dod$ 为20%的充放电循环, 与发生1次 $Dod$ 为60%的充放电循环相当。为了便于分析和计算, 可以将蓄电池的充放电循环次数统一在一个标准的 $Dod$ 上。

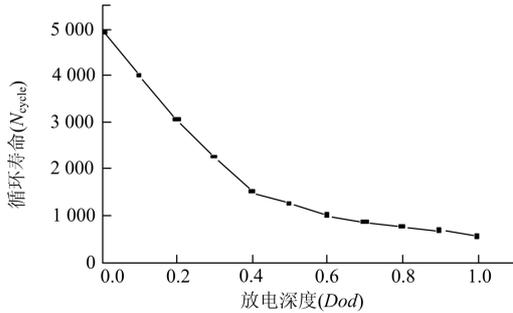


图14 蓄电池循环寿命与放电深度关系

Fig. 14 Functional relation between the cycle life and depth of discharge

假设蓄电池以放电深度 $Dod_r$ 作为标准, 以 $Dod_r$ 进行充放电时, 循环使用寿命为 $L_{Dod_r}$ ; 以放电深度 $Dod$ 进行充放电时, 循环使用寿命为 $L_{Dod}$ 。则蓄电池发生一次放电深度为 $Dod$ 的充放电循环, 等效为发生一次放电深度为 $Dod_r$ 的充放电循环次数:

$$N_{cycle} = \frac{L_{Dod_r}}{L_{Dod}} \quad (11)$$

在本仿真系统中, 根据设计时蓄电池容量的配置, 将其每天发生的充放电大循环的 $Dod$ 控制为

80%, 并将其设为 $Dod_r$ 。假设每天充放电大循环次数为 $a$ , 同时发生 $b$ 次放电深度为 $Dod$ 的小循环, 则蓄电池平均每天发生 $Dod$ 为80%的等效循环次数为

$$N_{cycle} = a + b \cdot \frac{L_{Dod_r}}{L_{Dod}} \quad (12)$$

由以上分析结合仿真结果图9, 可以计算出由于超级电容器的作用, 蓄电池的充放电等效大循环次数大约从每天的5次减少到每天3次, 相当于蓄电池使用寿命延长了40%。

下面结合1 MW/1 MW·h的北京某实际储能工程项目, 对该装置可带来的经济效益进行分析。

该项目采用某公司锂电池作为储能元件, 锂电池采购费用为350万元。锂电池循环寿命大约为5年, 第5年末锂电池堆的平均容量衰减率为80%, 单个电芯的最大容量衰减率为75%, 需要进行更换。忽略维护成本, 单一蓄电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)每年的运行成本约为70万元。假如采用基于该装置的BSHES系统, 则蓄电池使用寿命将延长至7年。锂电池和超级电容器单价如表1所示<sup>[21]</sup>。

表1 锂电池和超级电容器单价

Table 1 Unit price of lithium battery and super capacitor

类型	功率(元/W)	容量(元/Wh)	维护(元/Wh <sup>2</sup> )
锂电池	3.5	3.5	$5 \times 10^{-5}$
超级电容	3	5	$5 \times 10^{-5}$

文献[22]应用粒子群优化算法对蓄电池和超级电容器的功率配置比进行了优化。根据其优化结果, 并结合该仿真模型, 将蓄电池和超级电容器的容量配比设置为3:2, 即蓄电池容量为0.6 MW·h, 超级电容器容量为0.4 MW·h。以每14年为一个运行周期, 如表2所示: BESS系统中锂电池每个运行周期等效采购成本为980万元, 忽略维护成本, 其年平均运行成本为70万元; BSHES系统中每周期锂电池等效采购成本为420万元, 超级电容器采购成本为200万元, 总采购成本为620万元, 忽略维护成本, 其每年运行成本为44.3万元。由此可知, 该装置每个运行周期内可节约运行成本37%左右。

表2 BESS、BSHES系统中成本对比

Table 2 Cost comparison of BESS and BSHES system

系统	万元	
	周期等效采购成本	年平均运行成本
BESS	980	70
BSHES	620	44.3

因此,采用蓄电池和超级电容器混合储能,通过该装置和相关控制策略,使储能装置的充放电小循环尽量发生在超级电容器上,可以有效地减少蓄电池的充放电循环次数,延长电池使用寿命,显著降低系统的运行成本,提高储能系统的经济性。

#### 4 结论

本文针对间歇式可再生能源发电并网的功率波动问题,提出了一种基于混合储能的组合级联式多端口变流器拓扑结构,并研究了其相关控制策略。首先对组合级联式多端口变流器的工作原理进行了分析,然后构建了基于该装置的光伏电站并网模型,并在 PLECS 环境下进行了仿真,最后结合仿真结果和某实际储能项目对该系统带来的经济效益进行了定量分析。结果表明:本文所提拓扑及控制策略可有效平抑光伏电站输出功率波动,达到光伏电站并网的电能质量标准;还可充分利用蓄电池和超级电容各自特点,实现蓄电池平抑长期缓慢的功率波动而超级电容器平抑剧烈功率波动,减小蓄电池配置容量并显著延长其使用寿命。经济效益分析表明,该装置可使实际工程项目中蓄电池使用寿命延长 40%,每个运行周期内可节约运行成本 37% 左右,具有较大的经济收益。

#### 参考文献

- [1] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.  
WANG Jian, LI Xing-yuan, QIU Xiao-yan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-97.
- [2] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.  
CHEN Wei, SHI Jing, REN Li, et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in micro grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 112-115.
- [3] 唐西胜, 齐智平. 应用于微电网的储能及其控制技术[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 517-524.  
TANG Xi-sheng, QI Zhi-ping. Energy storage technologies and control methods of micro grid[J]. Acta Energetica Sinica, 2012, 33(3): 517-524.
- [4] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-153.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-153.
- [5] 赵洋, 梁海泉, 张逸成. 电化学超级电容器建模研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 188-195.  
ZHAO Yang, LIANG Hai-quan, ZHANG Yi-cheng. Review and expectation of modeling research on electrochemical supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 188-195.
- [6] 鲁鸿毅, 何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 87-91.  
LU Hong-yi, HE Ben-teng. Application of the super-capacitor in a micro grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 87-91.
- [7] 许爱国, 谢少军, 姚远, 等. 基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 117-123.  
XU Ai-guo, XIE Shao-jun, YAO Yuan, et al. Regenerating energy storage system based on ultra-capacitor for urban railway vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 117-123.
- [8] MENDIS N, MUTTAQI K M, PERERA S. Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(2): 944-953.
- [9] SAGGINI S, ONGARO F, GALPERTI C, et al. Supercapacitor-based hybrid storage systems for energy harvesting in wireless sensor networks[C] // IEEE Conference Publications, 2010: 2281-2287.
- [10] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.  
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [11] TAO Wei-qing, SUN Wen, DU Chen. Research on super-capacitor and battery hybrid energy storage system applied in micro-grid[C] // 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology, 2012.
- [12] 张冰冰, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于混合储能的光伏波动功率平抑方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 103-109.  
ZHANG Bing-bing, QIU Xiao-yan, LIU Nian, et al. Research on the method of stabilizing PV fluctuation power based on hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 103-109.
- [13] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 70-75.

- LI Feng-bing, XIE Kai-gui, ZHANG Xue-song, et al. Design on control strategy of hybrid storage system based on the charge and discharge state of Lithium battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 70-75.
- [14] 马学军. 数字移相控制隔离型半桥双向 DC/DC 变换器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- MA Xue-jun. Research of isolated half-bridge bidirectional DC/DC converter with digital shift-phase control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [15] PENG F Z, LI Hui, SU Gui-jia, et al. A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(1): 54-65.
- [16] 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 Chun-jiang, 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.
- [17] MIAO Qing, WU Jun-yong, AI Hong-ke. Study on coordinating control strategy of hybrid cascade energy storage and bi-directional power regulation device[C] // Asia-Pacific Conference on Electrical Engineering and Automation, 2013.
- [18] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- ZHANG Guo-ju, TANG Xi-sheng, QI Zhi-ping. Design of hybrid storage system to stabilize the intermittent power fluctuations of energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 24-28.
- [19] MUYEEN S M, ALI M H, TAKAHASHI R, et al. Wind generator output power smoothing and terminal voltage regulation by using STATCOM/ESS[C] // Proceedings of the 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, July 1-5, 2007: 1232-1237.
- [20] 胡毅, 陈轩恕, 杜砚, 等. 超级电容器的应用与发展[J]. 电力设备, 2008, 9(1): 19-22.
- HU Yi, CHEN Xuan-shu, DU Yan, et al. Development and application of super capacitor[J]. Power Equipment, 2008, 9(1): 19-22.
- [21] 杨裕生, 程杰, 曹高萍. 规模储能装置经济效益的判据[J]. 电池, 2011, 41(1): 19-21.
- YANG Yu-sheng, CHENG Jie, CAO Gao-ping. A gauge for direct economic benefits of energy storage devices[J]. Battery Bimonthly, 2011, 41(1): 19-21.
- [22] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 12(5): 91-97.
- HAN Xiao-juan, CHENG Cheng, JI Tian-ming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 12(5): 91-97.

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-08-02

作者简介:

田明杰(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 13121469@bjtu.edu.cn

吴俊勇(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制, 新能源发电和智能电网, 铁道电气化, 电力信息化。E-mail: wujy@bjtu.edu.cn