

基于超级电容与蓄电池混合储能的光伏应用

海 涛¹, 范攀龙¹, 王 钧², 林广宙³

(1.广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2.华蓝设计院, 广西 南宁 530004; 3.阳升新能源有限公司, 广西 南宁 530004)

摘 要:光伏发电系统的不稳定性严重影响储能系统的使用寿命。文章基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)实现超级电容的荷电状态(State of Charge, SOC)估算,并根据光伏输出的实时功率和超级电容的 SOC,提出一种新型可控拓扑结构,实现超级电容与蓄电池的混合储能,减缓了蓄电池充电电压突变的影响。在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,结果表明,在混合储能策略下,EKF 估算 SOC 的误差在 4%以内,明显抑制了蓄电池输入端电压的波动,可有效降低光伏输出不稳定性对蓄电池使用寿命的影响。

关键词: 光伏发电; 超级电容; 混合储能; 抑制波动

中图分类号: TK51; TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)09-1219-07

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,由太阳能等可再生能源组成的分布式发电成为关注重点^[1,2]。然而光伏具有间歇性、随机性和波动性的特点,储能系统对于减小其并网时功率波动、提高系统电能质量有着至关重要的作用^[3,4]。

目前,在分布式光伏发电系统中,通常以蓄电池作为储能装置^[5,6]。但蓄电池储能在频繁波动的光伏输出功率下,其循环使用寿命和充、放电效率较低,并且蓄电池本身成本较高,更换时都是整组同时进行,会大大提高光伏发电的成本^[7-10]。超级电容储能是一种新型储能方式,除其功率密度大、循环使用寿命长、充、放电效率高等特点外,超级电容充、放电属于物理过程,比蓄电池的化学过程更加安全、环保,因而得到了较高的关注^[11]。文献[12,13]提出超级电容与锂电池混合储能对于协调风力发电的平滑出力与延长电池寿命有积极作用。文献[14]通过对直流微电网中超级电容与电池的混合储能系统进行分析,并通过仿真验证了系统有提升电池性能的作用,但效果不够明显。

本文提出了一种超级电容与蓄电池混合储能的新颖拓扑结构,并将其作为光伏发电系统的储能装置。利用超级电容循环寿命长、可快速充、放电的特点,在光伏输出波动幅度过大时通过超级

电容的充、放电达到缓和储能蓄电池两端电压波动的作用。在仿真平台搭建基于超级电容与蓄电池混合储能的光伏发电系统仿真模型,结合实际光伏输出功率进行仿真分析,验证系统蓄电池两端电压波动的抑制效果。

1 超级电容模型及 SOC 估算

1.1 超级电容 Thevenin 等效模型

超级电容主要由集流体、电极、电解质及隔膜等组成。超级电容等效物理模型选取 Thevenin 模型,如图 1 所示。图中: U_{sc} 、 R_r 、 R_p 和 C_p 分别为超级电容的输出电压、等效内阻、极化电阻和等效电容; U_c 为理想电容 C 上的电压。

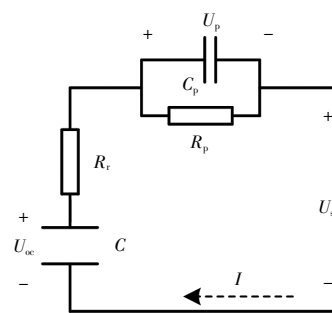


图 1 超级电容单体等效模型

Fig.1 Supercapacitor monomer equivalent model

依据 Thevenin 模型可得其电压、电流之间的关系为

收稿日期: 2023-02-23。

基金项目: 广西重点研发计划(桂科 AB22035037); 国家自然科学基金项目(51867003)。

作者简介: 海 涛(1963-),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事光伏发电储能、智能检测及电力系统节能等方面的研究。

E-mail: haitao5913@163.com

$$\begin{cases} U_{sc}=U_{oc}-IR_t-U_p \\ I=\frac{U_p}{R_p}+C_p \frac{dU_p}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

实际应用中一般采用多个超级电容串并联的方式提升其容量和电压,若超级电容组中串联单体为 m 、并联数为 n ,此时输出电压 U 和可以提供的最大能量 E_{sc} 为

$$\begin{cases} U=mU_{sc} \\ E_{sc}=\frac{n}{2m}C_{sc}(U_{max}^2-U_{min}^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{max} , U_{min} 分别为超级电容在安全工作范围内 U_{sc} 所能达到的上、下限值。

由式(2)可知,超级电容所存储的能量与其电压呈现非线性关系,且其能量随着电压的升高而增加,因此可以通过类比电池的开路电压法,获得超级电容 SOC 与其开路电压之间的函数关系。通过实验,获得不同 SOC 下超级电容开路电压值,部分实验数据的记录如表 1 所示。

表 1 不同 SOC 下超级电容开路电压

Table 1 Supercapacitor open circuit voltage under different SOC's

SOC/%	开路电压/V	SOC/%	开路电压/V
10	7.721 0	60	32.929 2
20	12.699 5	70	37.822 3
30	17.852 6	80	42.802 3
40	22.925 9	90	47.673 8
50	27.985 8	100	51.097 8

依据实验获得的数据,以 SOC 为自变量,开路电压 U_{oc} 为因变量,构造函数关系,并采用多项式进行拟合,结果为

$$U_{oc}=a_1SOC^6+a_2SOC^5+a_3SOC^4+a_4SOC^3+a_5SOC^2+a_6SOC+a_7 \quad (3)$$

其中系数的取值为实验数据拟合所得 $a_1=-8.99e^{-11}$, $a_2=3.09e^{-8}$, $a_3=-4.22e^{-6}$, $a_4=0.000\ 293$, $a_5=-0.011\ 1$, $a_6=0.729$, $a_7=0.848$ 。SOC 与开路电压的拟合曲线如图 2 所示。

1.2 扩展卡尔曼滤波算法估算 SOC

通过开路电压法虽然可以获得超级电容的 SOC 初始值,但是不能获得实时 SOC,通常通过扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法来实现超级电容的实时 SOC 估计。EKF 算法是一个非线性系统线性化的过程,通过将非线性函数的泰勒展开式进行一阶线性化处理并忽略高阶

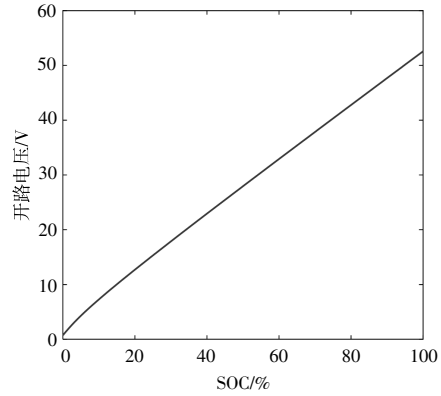


图 2 SOC 与开路电压拟合曲线

Fig.2 The SOC fits the curve to the open-circuit voltage

项,从而将卡尔曼滤波算法应用到非线性系统中^[5]。离散非线性系统空间表达方程和观测方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1}=f(\mathbf{X}_k, k)+\mathbf{w}_k \\ \mathbf{Z}_k=h(\mathbf{X}_k, k)+\mathbf{v}_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{X}_{k+1} 为 n 维状态向量; \mathbf{Z}_k 为 m 维观测向量; k 为离散时间; $\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$ 均为相互独立的高斯白噪声。

对非线性函数 $f(*)$ 和 $h(*)$ 关于 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 进行一阶泰勒公式展开,并忽略其高次项,进行线性化可得:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1}=\mathbf{A}_k\mathbf{X}_k+\mathbf{B}_k+\mathbf{w}_k \\ \mathbf{Z}_k=\mathbf{C}_k\mathbf{X}_k+\mathbf{D}_k+\mathbf{v}_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{A}_k 为状态转移矩阵,可实现系统变量的预测; \mathbf{B}_k 为系统输入矩阵; \mathbf{C}_k 为系统观测矩阵,用以驱动预测系统的观测值; \mathbf{D}_k 为系统的直接传递矩阵。

$$\begin{cases} \mathbf{A}_k=\frac{\partial f(\mathbf{X}_k, k)}{\partial \mathbf{X}_k} \Big|_{\mathbf{X}_k=\hat{\mathbf{X}}_k}, \mathbf{B}_k=f(\hat{\mathbf{X}}_k, k)-\mathbf{A}_k\hat{\mathbf{X}}_k \\ \mathbf{C}_k=\frac{\partial h(\mathbf{X}_k, k)}{\partial \mathbf{X}_k} \Big|_{\mathbf{X}_k=\hat{\mathbf{X}}_k}, \mathbf{D}_k=h(\hat{\mathbf{X}}_k, k)-\mathbf{C}_k\hat{\mathbf{X}}_k \end{cases} \quad (6)$$

此时,对线性化后的式(6)使用卡尔曼滤波基本方程,便可得到 EKF 的递推过程,其数学表达式为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- = f(\hat{\mathbf{X}}_k) \\ \hat{\mathbf{P}}_{k+1}^- = \mathbf{A}_k\hat{\mathbf{P}}_k\mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_{k+1} \\ \mathbf{K}_{k+1} = \hat{\mathbf{P}}_{k+1}^- \mathbf{C}_{k+1}^T (\mathbf{C}_{k+1}\hat{\mathbf{P}}_{k+1}^- \mathbf{C}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1})^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} [\mathbf{Z}_{k+1} - h(\hat{\mathbf{X}}_{k+1}^-)] \\ \hat{\mathbf{P}}_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{C}_{k+1}) \hat{\mathbf{P}}_{k+1}^- \end{cases} \quad (7)$$

式中: P 为均方误差; K 为卡尔曼增益; I 为 $n \times m$ 的单位矩阵; Q, R 分别为 w 和 v 的方差。

通过上述公式即得到超级电容 Thevenin 模型的电流、电压与荷电状态的状态空间方程,将其联合并离散化,可得状态方程为

$$\begin{cases} x(k|k-1) = A_{k-1}x(k-1) + B_{k-1}i_{k-1} + w_k \\ A_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-t/\tau} \end{pmatrix}, B_k = \begin{pmatrix} -\frac{t}{Q_0} \\ R_p(1-e^{-t/\tau}) \end{pmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

观测方程为

$$y_k = h(x_{k-1}, i_{k-1}) + v_k = U_{oc} - R_p i_{k-1} - u_k + v_k \quad (9)$$

由状态方程和观测方程即可开始对 SOC 的值进行一系列的循环迭代,通过不断的循环计算使得 SOC 的估计值不断逼近真实值。其计算效果如图3 所示。

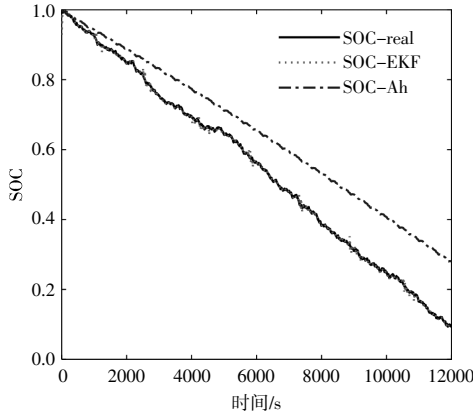


图 3 基于 EKF 与 Ah 积分法的 SOC 估算

Fig.3 SOC estimation based on EKF and Ah integral method

EKF 与 Ah 积分法的 SOC 误差曲线如图 4 所示。

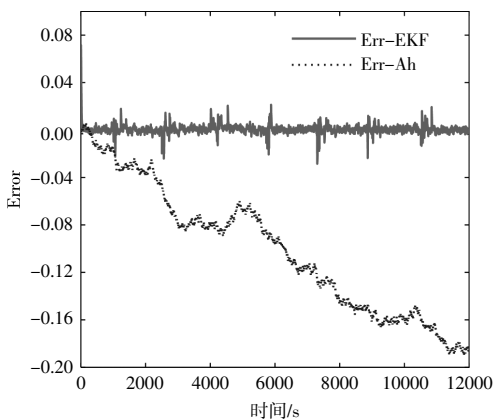


图 4 EKF 与 Ah 积分法的 SOC 误差曲线

Fig.4 SOC error curve of EKF and Ah integral method

由图 4 可知:Ah 积分法估算 SOC 随着时间

的累计误差逐渐增大,误差可达到 20%;EKF 算法的估计值始终在真实值附近波动且其估计误差始终低于 4%。

2 混合储能拓扑结构与仿真模型

2.1 混合储能拓扑结构

超级电容与蓄电池混合储能的拓扑结构如图 5 所示。对光伏矩阵的输出功率进行实时监测,同时对超级电容与蓄电池组的荷电状态进行预测与估算,依据二者的值控制晶体管 Q_1, Q_2 的导通与截止。该结构降低了光伏发电系统在储能过程中蓄电池两端输入电压的大幅波动对蓄电池使用寿命的影响。

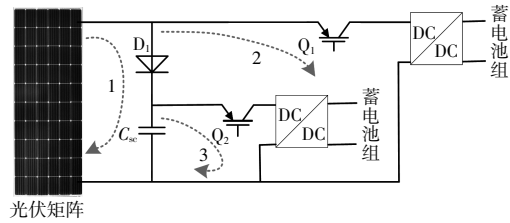


图 5 混合储能拓扑结构

Fig.5 Hybrid energy storage topology diagram

状态 1:光伏发电系统初始阶段,即光伏发电开始,首先对超级电容的 SOC 进行检测,在其小于设定值 SOC1 (在此设定为额定容量的 50%) 时,晶体管 Q_1, Q_2 均处于截止状态,此时拓扑电路仅有通路 1 处于工作状态,即对超级电容进行充电。因为该工作状态出现在光伏发电的起步阶段,此时的光照强度和温度较低,并且变化速度快,所以光伏矩阵的发电功率低且波动幅度较大,不利于进行蓄电池储能,反之对超级电容储能的影响则很小。

状态 2:超级电容的 SOC 超过 SOC1,控制 Q_1 一直处于导通状态,此时拓扑结构图中的通路 1,2 处于工作状态; Q_2 的状态则与光伏矩阵的发电功率相关,由于遮挡等因素导致发电功率快速下降,不足以使蓄电池正常充电时,控制 Q_2 导通,即通路 3 开始工作,超级电容也对蓄电池组进行充电,以此维持蓄电池组充电时端电压的稳定输入。该工作状态对光照强度大、云层较多等易造成光伏发电系统输出功率短期内大幅波动的天气情况有着很好的稳定作用。

状态 3:光伏发电系统即将停止工作阶段,在光照强度为 0 时,即光伏矩阵停止发电,输出功率为 0,此时控制 Q_1 断开、 Q_2 导通,通路 3 单独处于

工作状态,超级电容将存储的电能释放,用以对蓄电池组继续充电。该状态下可以延长蓄电池的充电时间,同时将超级电容存储的电能传输到蓄电池中更好地保存。

2.2 混合储能仿真模型

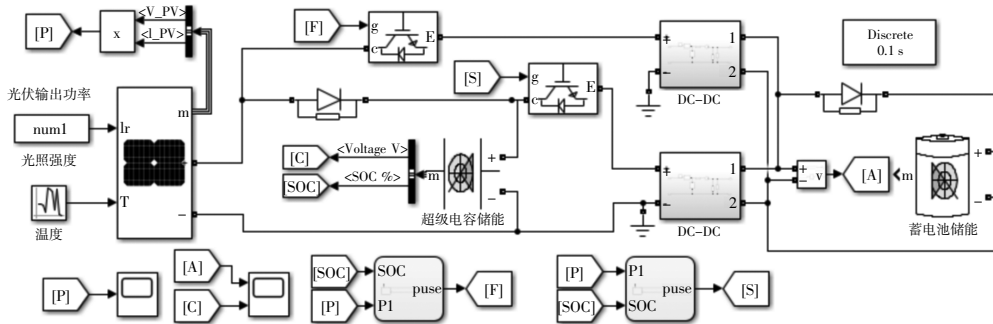


图 6 混合储能系统仿真模型

Fig.6 Simulation model of hybrid energy storage system

在蓄电池储能前,经 DC/DC 转换器将光伏输出电压调至蓄电池可接受充电电压范围,依据光伏输出功率和超级电容的荷电状态实现系统混合储能,提升蓄电池充电电压的稳定性。仿真模型的相关基础参数如表 2 所示。

表 2 仿真模型相关参数

Table 2 Simulation model related parameters

设备	参数	数值
光伏阵列	最大功率/W	175.09
	开路电压/V	43.99
	短路电流/A	5.17
	最大功率点电压/V	36.63
	最大功率点电流/A	4.78
电池	标称电压/V	7.2
	额定容量/Ah	5.4
	初始荷电状态/%	50
超级电容	额定电压/V	48
	额定电容/F	100
	初始电压/V	0

基于仿真模型,搭建了混合储能系统的实物图,如图 7 所示。

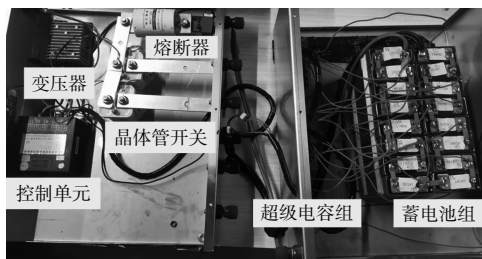


图 7 混合储能系统实物图

Fig.7 Physical diagram of the hybrid energy storage system

依据对拓扑结构的分析,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型如图 6 所示。仿真所用光伏发电矩阵的型号为 A10Green Technology A10J-S72-175,光照强度、温度等输入信号依据实验需求可以进行调节。

通过控制单元完成超级电容与蓄电池组实时状态检测,同时控制晶体管的工作状态,熔断器具有保护电路的作用。其中,蓄电池组采用 16 只 3.2 V/10 Ah 的磷酸铁锂电池,通过 8 串联 2 并联的连接方式组成,超级电容组选用 16 个 3 V/100 F 的超级电容 8 串联 2 并联组成。

3 实验结果分析

对混合储能与传统电池储能系统分别进行实验,并记录其充电电压波形。首先对系统输入 30 V 直流充电电压,在输入稳定后将电压突降至 20 V,之后再突升至 30 V,实验中有元器件的电压损耗,故测量电压略低于输入值,如图 8 所示。

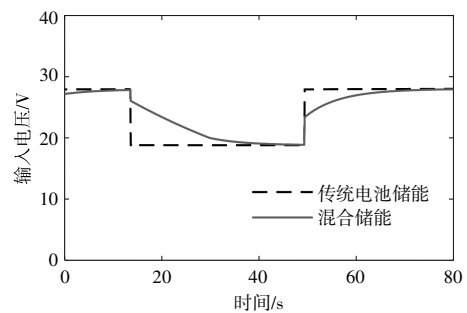


图 8 混合储能实验中的充电电压波形

Fig.8 Charging voltage waveform in a hybrid energy storage experiment

由图 8 可知,混合储能系统在超级电容作用下,对电压的突变有一个较好的缓冲作用,在该实验成立的基础上,对所提混合储能系统进行了仿真实验。

为了验证系统模型的可靠性,对其进行了脉

冲实验,观察其在光伏输入频繁波动下的工作特性。在仿真系统中输入周期性波动的光照强度,每5 s输入光照强度即产生变化,以此验证在光伏输入波动情况下该混合储能系统的优越性。传统光伏储能系统与混合储能系统下蓄电池的输入电压情况如图9所示。

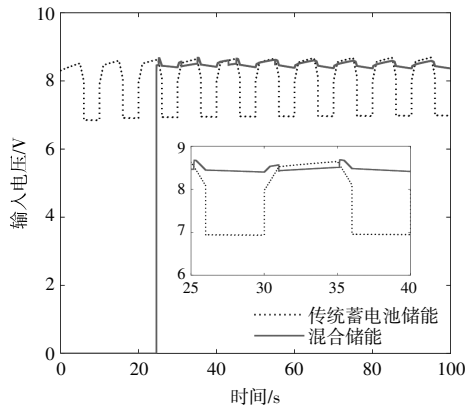


图9 均匀脉冲实验时蓄电池输入电压

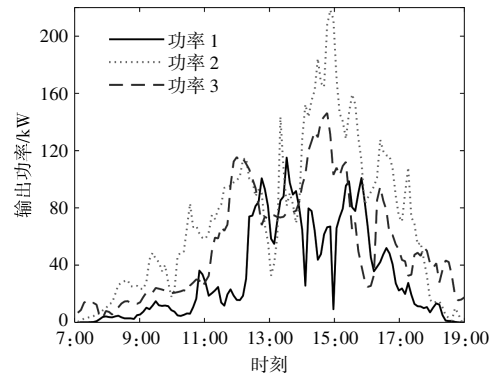
Fig.9 Battery input voltage during uniform pulse experiment

由图9可知,传统储能模式下蓄电池两端的输入电压随着光照强度呈现周期性变化,光照为0时停止对蓄电池充电,图中最低电压为蓄电池电压。混合储能模式下,初始时间25 s内未对蓄电池进行充电,在这段时间内系统对超级电容执行充电操作,在25 s后超级电容已完成充电,系统开始对蓄电池进行充电。在同样的光照情况下,该系统可以实现对蓄电池的持续充电,并保持输入电压基本稳定,在光照下降时,输出电压反而有突增的趋势,原因就是此时超级电容对电池进行放电,用以维持电池两端输入电压的稳定。

在实际应用中,光伏输出功率的变化更加复杂,图10为广西南宁市某地的一个装机容量为640 kW的并网屋顶分布式光伏发电系统的实时输出功率。其中的3条功率曲线是随机选取光伏



(a)屋顶光伏发电设施



(b)光伏发电的输出功率

图10 南宁某屋顶光伏发电设施及其实时输出功率
Fig.10 Real-time output power of a rooftop photovoltaic power generation facility in Nanning

屋顶在不同天气状况下的实时功率输出。

由图10可知,光伏发电输出功率的波动幅值较大,尤其是在下午,随着光照强度增大时,输出功率会因云层短时遮挡等原因而出现功率骤降的现象,以功率曲线1的波动幅度最为严重,在13:00-15:00的功率输出最低时几乎降为0。光伏输出功率的波动性受环境因素制约不可避免,同时也将造成光伏储能输入端的波动,尤其是输入电压的频繁波动将会对储能电池的使用寿命产生巨大的影响,该混合储能策略的目的即是增强储能输入端电压的稳定性,提高蓄电池组的使用寿命。

对于图10中光伏发电系统实时输出功率的波动情况,选取波动幅度大、波动频繁的区域并对其数据进行处理,得到模拟实验中的输入光照强度,如图11所示。其中包括光照强度的快速下降、快速上升以及不断波动等光伏发电中常见的天气状况。

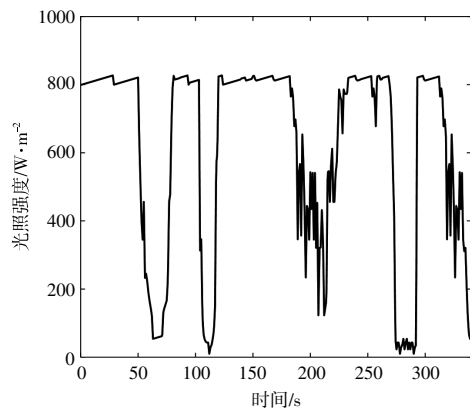


图11 模拟实验输入光照强度

Fig.11 Simulates the input light intensity of the experiment

将图 11 的光照强度分别输入混合储能系统与传统储能系统, 对比其在实际工作中储能蓄电池两端的充电电压变化情况, 经仿真模型得到其输出结果, 如图 12 所示。

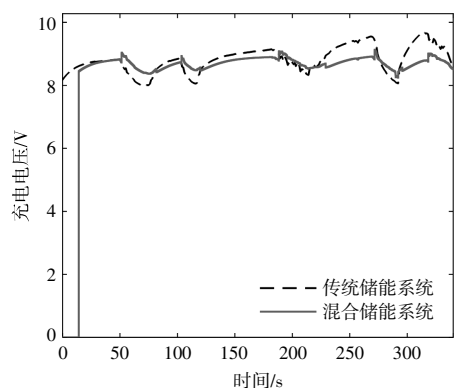


图 12 两种系统下蓄电池两端的充电电压

Fig.12 The charging voltage across the battery under two systems

由图 12 可以看出, 在混合储能系统下蓄电池两端的充电电压波动幅度明显小于传统储能系统, 获得其输出数据并对数据进行分析 (大概从 20 s 后混合储能开始对蓄电池充电)。将获取的数据分别求取方差和标准差可得:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (10)$$

由式(10)可得两种系统的输出电压数据, 求得其离散系数为

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (11)$$

式中: \bar{x} 为所有数据的平均值。

具体数值如表 3 所示。

表 3 两种储能系统下的数据分析对比

Table 3 Data analysis and comparison under two energy storage systems

类型	极差/V	方差	标准差	离散系数
传统储能	1.71	0.169	0.411	0.046
混合储能	0.88	0.025	0.159	0.018

由表 3 可知: 传统储能蓄电池两端充电电压极差为 1.71 V, 而混合储能为 0.88 V, 与前者相比缩小了 1 倍; 通过离散系数能更好地反映电压的波动程度, 对数据分析计算可知, 混合储能模式下的离散系数远小于传统储能模式。由该结果可以

证实, 与传统储能相比, 在混合储能系统下蓄电池两端的充电电压将会更加稳定, 能够有效地降低电压波动对其带来的危害。

4 结束语

针对光伏发电的波动性对储能蓄电池使用寿命的影响, 本文利用超级电容可快速充放电、循环寿命长、维护成本低等特点, 将其与蓄电池组成混合储能系统, 降低光伏输出波动性对蓄电池的影响。研究内容如下。

①依据超级电容的 Thevenin 等效电路模型, 提出并使用 EKF 算法估算超级电容的 SOC, 并对估算过程进行了推导和分析。通过仿真对 EKF 算法和 Ah 积分法进行对比, EKF 算法估算 SOC 优于 Ah 积分法, 并且误差始终保持在 4% 以内。

②本文提出一种新型的超级电容与蓄电池混合储能的拓扑结构, 分别通过 MATLAB/Simulink 仿真模型和实物进行试验, 结果表明, 在传统储能与混合储能下, 蓄电池输入电压的离散系数分别为 0.046 和 0.018。本文所提拓扑结构有效提高了储能蓄电池端电压的稳定性。

参考文献:

- [1] 雷金勇, 谢俊, 甘德强. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 29-36.
- [2] 陈海生, 刘畅, 徐玉杰, 等. 储能技术在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用 [J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1477-1485.
- [3] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10, 20.
- [4] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [5] 袁龙. 分布式光伏发电与储能协同调度模型研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [6] 陶琼, 王德顺, 叶季蕾, 等. 考虑储能配置模式的多数据源融合分布式光伏发电并网接纳分析方法 [J]. 高压电压技术, 2018, 44(4): 1093-1098.
- [7] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置 [J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
- [8] 高志刚, 姜奋林. 蓄电池储能系统的模块化均压拓扑研究 [J]. 高压电压技术, 2016, 42(4): 1300-1307.

- [9] Li Xia,Zeng Zhaoxiang.The intelligent control for the battery charge in the solar lighting system [A]. International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP)[C].Hohhot:ICEEP,2012.296-300.
- [10] 许鸣吉,沈磊,李胜,等.接入光伏、风电的上海中原地区配电网重构研究[J].电测与仪表,2023,60(5):140-146.
- [11] 汤旭晶,刘雄航,孙玉伟,等.基于超级电容的船用光伏并网系统功率控制[J].中国航海,2021,44(1):94-99.
- [12] 杨帆,任永峰,云平平,等.双级锂电池-超级电容混合储能的协调控制及功率分配[J].可再生能源,2019,37(3):361-366.
- [13] 马茜,郭昕,罗培,等.一种基于超级电容储能系统的新型铁路功率调节器[J].电工技术学报,2018,33(6):1208-1218.
- [14] Arunkumar C R,Manthat Udaya Bhasker,Srinivas Punna.Accurate modelling and analysis of battery - supercapacitor hybrid energy storage system in DC microgrid systems[J].Energy Systems,2022(13):1055-1073.
- [15] 王顺利,李小霞,熊莉英,等.锂电池等效电路建模与荷电状态估计[M].北京:机械工业出版社,2021.

Photovoltaic applications based on hybrid energy storage of supercapacitors and batteries

Hai Tao¹, Fan Panlong¹, Wang Jun², Lin Guangzhou³

(1.College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.Hualan Design Institute, Nanning 530004, China; 3.Yangsheng New Energy Co.,Ltd., Nanning 530004, China)

Abstract: The instability of power generation in photovoltaic power generation system is difficult to avoid, and its instability will cause a great burden on the energy storage system, of which the impact on the service life of the battery is the most serious. Based on extended Kalman Filter (EKF) to achieve supercapacitor state of charge (SOC) estimation, according to the real-time photovoltaic output power and SOC of the supercapacitor, a new controllable topology is controlled to achieve hybrid energy storage of supercapacitor and battery, so as to alleviate the sudden change of battery charging voltage. In MATLAB/Simulink, the simulation model is constructed, the results show that the error of EKF estimating SOC is within 4%, and the fluctuation of the input voltage of the battery is significantly suppressed under the hybrid energy storage strategy, which can effectively reduce the impact of photovoltaic output instability on battery service life.

Keywords: photovoltaic power generation; supercapacitors; hybrid energy storage; suppress fluctuation