

研究开发

风光互补系统中混合储能容量优化配置研究

李瑞民^{1,2}, 张新敬^{1,2}, 徐玉杰^{1,2}, 孙雯雯^{1,2}, 周学志^{1,2}, 郭 丛¹, 陈海生^{1,2}

(¹中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 储能系统可以有效解决微电网中分布式可再生能源特别是风光互补发电的间歇性、波动性以及“源”与“荷”错位的问题。不同储能技术在响应时间、容量规模、技术成熟度及成本等方面各有特点, 两种或多种储能技术耦合将可以更加有效地满足用电系统的技术性和经济性的要求。针对电力用户对分布式可再生能源的利用情况, 本文提出一种由压缩空气储能、锂电池和超级电容器组成的混合储能系统, 建立了三种储能的数学模型, 针对其不同的特性, 提出了基于二次移动平均滤波的储能系统功率分配方法和基于连续性运行的容量优化配置方法。基于某个实际的用户负荷进行了案例分析, 得到了混合储能系统的功率和容量配置结果, 并分析了其运行特性。研究表明, 在分布式可再生能源微电网中, 多种储能技术耦合既能充分发挥每种储能的优势, 又可以通过相互配合弥补各自的劣势, 这对于可再生能源的充分利用和满足用电负荷的严苛需求具有重要的作用和意义, 在分布式能源利用领域具有较好的工程应用前景。

关键词: 可再生能源; 混合储能; 功率分配; 容量配置

doi: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0014

中图分类号: TM 61

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2019) 03-512-11

Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity for wind-solar generation system

LI Ruimin^{1,2}, ZHANG Xinjing^{1,2}, XU Yujie^{1,2}, SUN Wenwen^{1,2}, ZHOU Xuezhong^{1,2}, GUO Cong¹, CHEN Haisheng^{1,2}

(¹Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The energy storage system can effectively solve problem of intermittence, volatility and source-load misalignment of distributed renewable energy ,especially wind-solar generation in the micro-grid system. Different energy storage forms have their own characteristics in terms of response time, power and energy capacity, technological maturity and cost, etc. The hybridization of two or more types of energy storage technology will be a good solution to meet the technical and economic requirements of energy utilization system. In this paper, a hybrid energy storage system consisting of compressed air energy storage, lithium battery and supercapacitor is proposed, and mathematical modellings of three energy storage systems are established. For different characteristics, a power allocation method based on secondary moving average filtering and a capacity optimal allocation method based on continuous operation are proposed. Based on a practical customer load requirement, the power and capacity configuration results of the hybrid energy storage system are obtained, and the operational characteristics are analyzed. The research indicates that in the system of distributed renewable energy micro-grid, the coupling of multiple energy storage technologies can not only

收稿日期: 2019-02-20; 修改稿日期: 2019-03-06。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0903605), 国家自然科学基金项目 (51676181), 北京市科技新星项目 (Z171100001117065), 中国科学院国际合作局国际伙伴计划 (182211KYSB20170029)。

第一作者: 李瑞民 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电与混合储能技术, E-mail: lirui@iet.cn; 联系人: 陈海生, 研究员, 主要研究方向为新型大规模电力储能系统与材料、微型燃气轮机、微小尺度流动与传热等, E-mail: chen_hs@mail.etp.ac.cn。

fully utilize the advantages of each type of energy storage, but also compensate for their respective disadvantages through mutual cooperation. That has an important role and significance of fully utilize renewable energy and satisfy demand of electric load, and has a good engineering application prospect in the field of distributed energy utilization.

Key words: renewable energy; hybrid energy storage system; power allocation; capacity configuration

开发利用风电、光伏等可再生能源对保障能源安全、保护生态环境和实现可持续发展具有重大意义,但可再生能源固有的间歇性和波动性制约着其大规模入网利用。分布式可再生能源发电与用户负荷之间经常性的出现源荷错位的现象^[1-2]。为了解决上述问题,微电网技术的研发与应用得到广泛关注。微电网集成了分布式可再生能源、储能以及负荷,并具有先进的电力电子系统以及监测与控制系统,可以自行平衡供能与用能的负荷变化,有效实现网内的能量优化,既可以离网运行,亦可以并网运行,具有微型、清洁、自调节以及友好的优点^[3-4]。

在微电网中,储能是最重要的环节之一。常见的储能可分为功率型储能和能量型储能,前者(如超级电容器等)功率密度大、响应速度快,但其充放电时间短、成本相对较高^[5-6];后者(如压缩空气储能等)释能时间长、成本相对较低,但其功率响应时间相对较长且不宜频繁充放电^[7-8]。而风光互补发电系统中,既有瞬时的冲击功率,又有长时间的储释能需求,同时还需兼顾系统的经济性,单一的储能无法较好地满足技术性和经济性的要求。因此,将不同类型的储能混合利用既能发挥每种储能的优势,又能弥补其在某方面的不足,起到“扬长避短”的效果。因而,混合储能系统成为了可再生能源利用与分布式供能领域的研究热点^[9-11]。

关于混合储能系统,如何对其进行功率分配和容量配置对整个微电网系统的技术性和经济性有着重要的影响。研究人员针对蓄电池和超级电容的混合储能系统研究最多,如文献[12-14]通过低通滤波方法、频谱分析法及傅里叶变换法等分配蓄电池和超级电容的功率,配置其容量。文献[15-17]采用启发式的智能算法,如改进的粒子群算法、遗传算法等,在一些约束条件下,以储能成本最低为目标搜寻最优的功率和容量。另外还有文献利用统计学方法对蓄电池和超级电容的功率进行概率统计、蒙特卡洛模拟等,进而优化容量配置^[18-19]。这种组合形式具有变工况特性好、容易控制等优点,但由于两种储能的容量成本较高,只能发展较小规模的系统。还有学者研究了压缩空气储能与超级电

容或飞轮储能混合的系统^[20-22],这种混合系统既有大容量、长时间的储释能能力,又能吸收冲击负荷。但由于压缩空气储能的响应时间相对较长,较大变工况调节性能不佳,而超级电容和飞轮储能的充放电持续时间短、成本高,导致整个系统应对分钟至小时级的功率的能力不足,储能成本偏高。

文献[23-25]将燃料电池、锂电池和超级电容三种储能装置耦合在风光互补发电系统中,其中燃料电池作为容量性储能,而锂电池和超级电容配合作为功率型储能,通过非线性的模糊逻辑控制等方法进行能量分配和管理,然而燃料电池运行环境要求苛刻,造价很高,技术还未完全成熟。山东大学的学者^[26-27]提出了压缩空气储能-铅蓄电池-超级电容混合的系统,通过经验模式分解或低通滤波的方式进行储能系统功率分配,使三种储能设备分别补偿低、中、高频的功率,并采用折算年均费用的方法计算了系统的全寿命周期成本。但是该研究只采用了统一的储能模型,尚未考虑不同储能的特性差异,尚未建立详细的储能数学模型,尚需进一步考虑每种储能内部主要参数之间的相互关联和影响,尤其是压缩空气储能系统的温度、压力等参数之间的耦合关系。

因此,本文针对风光互补发电系统的微电网,提出一种由压缩空气储能、锂电池和超级电容器组成的混合储能系统。通过分析三种储能装置的原理和输出特性,建立其详细的数学模型,采用二次移动平均滤波法分配三种储能的功率,在连续性运行和系统供电可靠性等约束条件下,优化配置储能的容量。本文通过实际的案例计算验证了该混合储能系统的优越性以及提出的功率分配和容量优化配置方法的有效性。

1 系统结构与储能系统建模

1.1 系统结构

如图1所示为本文提出的集成风光互补发电的混合储能系统结构。其中负荷部分需由风电、光伏和储能联合组成供电系统为其供电,满足其可靠性

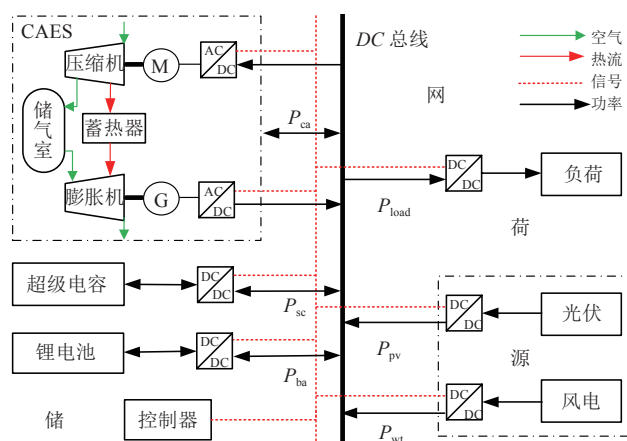


图1 集成风光互补发电的混合储能系统结构图

Fig.1 Hybrid energy storage system topology diagram of wind-solar generation

要求。风电和光伏发电为微电网的供能系统，提供主要的能量来源， P_{wt} 和 P_{pv} 分别为风电和光伏的输出功率；压缩空气储能系统、锂电池和超级电容器组成混合储能系统作为微电网的能量管理设备，通过电力电子变换器与总线并联。其中 P_{ca} 、 P_{ba} 和 P_{sc} 分别代表压缩空气储能、锂电池和超级电容的功率，其值为正时代表储能，为负值时代表释能；控制器根据能量管理策略，通过控制每个部件的电力电子变换器的启动、停止以及运行时间，从而达到能量在源、荷、储、网中合理调配的目的。

1.2 储能系统建模

1.2.1 压缩空气储能系统模型

采用的压缩空气储能系统结构如图2所示，主要的部件有压缩机、换热器、储气室、膨胀机、蓄

热罐和蓄冷罐，其中压缩系统采用四级压缩，级间冷却方式，膨胀系统采用两级膨胀，级间再热方式，储气室采用定容储气室，蓄热/冷罐介质均为水^[28]。

压缩机单级耗功：

$$W_c = \frac{m_c \cdot c_p \cdot T_{c,in} \cdot (\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{\eta_c} \quad (1)$$

压缩机出口温度：

$$T_{c,out} = T_{c,in} \cdot (\beta^{\frac{k-1}{k}} + 1) \quad (2)$$

压缩机换热器出口空气温度：

$$T_c' = (1 - \varepsilon)T_{c,out} + \varepsilon T_L \quad (3)$$

式中， W_c 为压缩机单级功率； m_c 为压缩系统空气质量流量； c_p 为空气定压热容； $T_{c,in}$ 为压缩机进口温度，第一级压缩机进口温度为环境温度298 K； β 为压缩机单级压比； $T_{c,out}$ 为压缩机出口温度，绝热指数 k 取1.4， η_c 为压缩机等熵效率； ε 为换热器效能； T_L 为蓄冷罐温度。

膨胀机单级做功：

$$W_e = m_e \cdot c_p \cdot T_{e,in} \cdot (1 - \pi^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_e \quad (4)$$

膨胀机出口温度：

$$T_{e,out} = T_{e,in} \cdot [1 - \eta_e (1 - \pi^{\frac{1-k}{k}})] \quad (5)$$

式中， W_e 为膨胀机单级功率； m_e 为膨胀系统空气质量流量； η_e 为膨胀机等熵效率； $T_{e,in}$ 为膨胀机进口温度； π 为膨胀机单级膨胀比， $T_{e,out}$ 为膨胀机出口温度。

压缩空气储能系统的储气室类型主要有定压

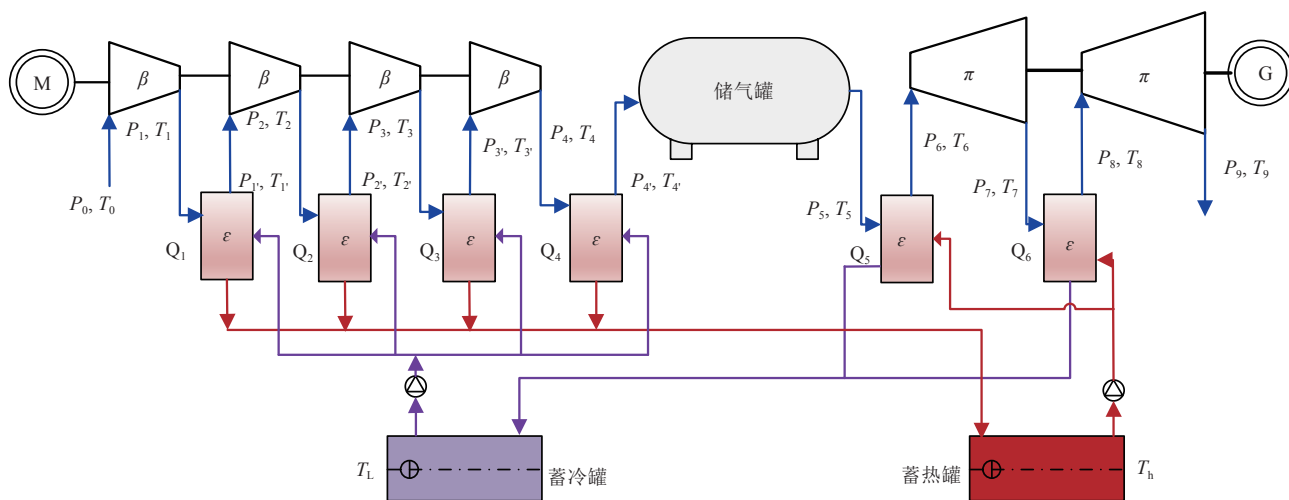


图2 压缩空气储能系统结构

Fig.2 Structure of compressed air energy storage system

储气室和定容储气室。其中定容储气室多采用地下洞穴或储气罐的方式，应用较为广泛。本文采用定容储气室方式^[29]。

储气室模型：

$$\begin{aligned} mu &= m_0 u_0 \pm c_p T \int m_a \cdot dt + A \cdot K(T - T_0) \\ m &= m_0 \pm \int m_a \cdot dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中， m_0 为初始空气质量； m_a 为质量流量； u_0 为初始空气内能； c_p 为空气定压比热容； A 为储气室换热面积； K 为储气室表面换热系数； T 为储气室内空气温度； dt 为时间步长。

压缩空气储能系统中，储气室的气压反映着实际的储能和释能的能力大小，本文采用储气室气压计算压缩空气储能系统的荷电状态。

$$SOC_{ca} = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \quad (7)$$

式中， P 为储气室实时气压； P_{min} 、 P_{max} 为储气室的最低和最高气压。

1.2.2 锂电池模型

描述电池特性的模型主要有电化学模型、耦合模型、等效电路模型等，其中等效电路模型使用电阻、电容和电压源等电路元件组成电路，模拟电池的动态特性，便于使用电路和数学方法进行分析，因此应用最为广泛。戴维南等效电路模型结构如图3所示，主要由开路电压 U_{OCV} 、欧姆内阻 R_s 、极化内阻 R_p 和极化电容 C_p 四部分构成，其中欧姆内阻 R_s 用来描述电池内部的耗散特性， R_p 和 C_p 构成的并联环节用来描述电池的极化现象。试验表明，当电池有电流流过时，电池的端电压既呈现突变性，也表现出渐变性，其中内阻 R_s 导致了电池端电压的突变性，极化电容 C_p 决定了电池端电压的渐变性^[30-33]。

根据基尔霍夫定律和能量守恒定律得到：

$$\frac{dU_p(t)}{dt} = \frac{I_L(t)}{C_p} - \frac{1}{C_p \cdot R_p} U_p(t) \quad (8)$$

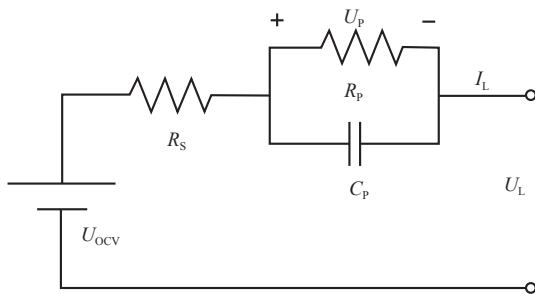


图3 电池戴维南等效电路模型

Fig.3 Thevenin equivalent circuit Model of battery

$$U_L = U_{OCV} - U_p - I_L \cdot R_s \quad (9)$$

$$I_L = \frac{U_{OCV} - U_p - \sqrt{(U_{OCV} - U_p)^2 - 4R_s P_L}}{2R_s} \quad (10)$$

$$SOC_{ba} = SOC_0 - \int \frac{I_L \cdot dt}{3600 \cdot Q} \quad (11)$$

式中， U_p 为极化电压； U_L 为端电压； I_L 为电池电流， P_L 为电池输入或输出的功率； SOC_0 为电池初始荷电状态值； Q 为电池A·h容量。

1.2.3 超级电容模型

超级电容的数学模型主要有经典等效模型、梯形模型、基于动态特性的模型和基于阻抗特性的模型等^[34]。其中经典等效模型如图4(a)所示，主要包括等效串联电阻 R_{es} 、等效并联电阻 R_{ep} （漏电阻）和并联电容 C ，其中 R_{es} 反映超级电容充放电过程中的能量损耗和充放电速率， R_{ep} 反应超级电容的电量保持能力，通常漏电流很小，所以在短期充放电过程中可以忽略漏电阻的影响。

超级电容器模型可简化为理想电容 C 和等效串联电阻 R 的串联结构，如图4(b)所示。这种模型结构简单、参数容易辨识，能较为准确地反映超级电容器在充放电过程中的外在电气特性。由于超级电容单体的电压很低，因此通常将多个单体串并联组成超级电容模组应用。假设每个单体电阻和电容参数值相同，则超级电容模组总的电阻值和电容值的计算比较简单，而且串并联之后电阻和电容的特性并不会改变。因此，简单的超级电容组的等效模型可以用RC网络来表征^[35-37]。

超级电容电流：

$$I_{sc}(t) = C_{sc} \frac{dU_{sc}(t)}{dt} \quad (12)$$

超级电容内部电压：

$$U_{sc}(t) = U_{sc0} - \frac{1}{C_{sc}} \int_0^t I_{sc}(t) dt \quad (13)$$

超级电容端电压：

$$U_{sc_out}(t) = U_{sc}(t) - I_{sc}(t) \cdot R_{sc} \quad (14)$$

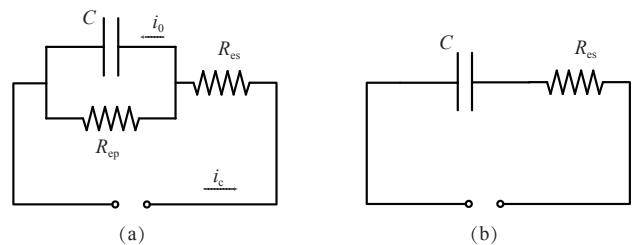


图4 超级电容等效电路模型

Fig.4 Equivalent circuit model of supercapacitor

超级电容功率:

$$P_{sc}(t) = I_{sc}(t) \cdot [U_{sc} - \frac{1}{C_{sc}} \int_0^t I_{sc}(t) dt - I_{sc}(t) \cdot R_{sc}] \quad (15)$$

超级电容的端电压反映其实时的充放电状态, 因此, 通常采用电压计算荷电状态。

$$SOC_{sc} = \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (16)$$

式中, U 为超级电容实时的电压; U_{min} 和 U_{max} 分别为最小电压和最大电压。

2 容量配置与优化

假设在一个典型日中, 某个重要负荷的用电情况已知。本文考虑在纯可再生能源供电的情况下, 通过配置储能组成供电系统, 为该重要负荷提供稳定的电力。在保证用电负荷可靠性要求的基础上, 研究不同储能组成混合储能系统时的能量分配、容量优化配置以及其运行特性。

2.1 储能容量配置

移动平均滤波法经常用来信号降噪和平滑数据, 其计算方法为^[38]:

$$Y(n) = \frac{1}{2m+1} \sum_{k=n-m}^{n+m} y(n-k) \quad (17)$$

式中, $y(n)$ 代表原始数据序列; $Y(n)$ 代表滤波得到的目标序列; m 为正整数, $2m+1$ 为滤波宽度^[39]。

本文对储能系统的功率分配方法如图5所示。对发电功率(风电 P_{wt} 和光伏 P_{pv}) 和用电负荷功率 P_{load} 作差, 得到功率差额 ΔP , 此为储能系统需要承担的部分。由于风电和光伏发电具有强波动性和间歇性, ΔP 中包含多种频次的功率, 考虑到各个储能系统的特性及成本等问题, 本文采用二次移动平均滤波法对 ΔP 进行分频, 由三种储能分别承担。如式(18)为具体计算公式, 其中 *smooth* 表示上述的移动平均滤波方法函数, 系 MATLAB 中的一种调用函数, 其计算方法如式(17)所示。

$$\begin{cases} \Delta P = P_{wt} + P_{pv} - P_{load} \\ P_s = \text{smooth}(\Delta P, 5) \\ P_{sc} = \Delta P - P_s \\ P_{ca} = \text{smooth}(P_s, 101) \\ P_{ba} = P_s - P_{ca} \end{cases} \quad (18)$$

ΔP 经过一次移动平均滤波得到功率 P_s , 用 ΔP 作差, 得到最高频次的功率 P_{sc} , 考虑到超级电容具有响应速度快、循环寿命长等特性, 这部分功率由超级电容承担; 对 P_s 进行一次移动平均滤波得到最平滑的功率 P_{ca} , 考虑到压缩空气储能系统具

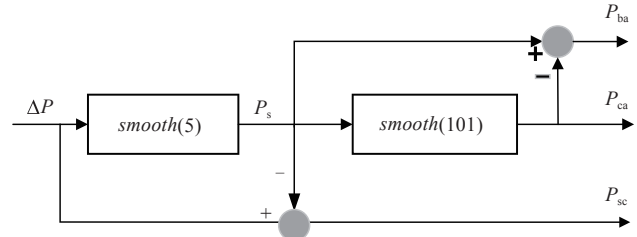


图5 二次移动平均滤波法

Fig.5 Secondary moving average filtering method

有响应速度较慢、变工况特性较差、储释能时间长和容量成本低等特点, 该部分由压缩空气储能系统承担; 对 P_s 和 P_{ca} 作差得到功率 P_{ba} , 此部分功率居于高频次和低频次之间, 考虑到锂电池的能量密度高、变工况性能好、充放电次数少和成本高等特点, 该部分由锂电池承担。

2.2 计算与优化流程

由于储能系统在储释能过程中存在损耗, 需考虑储能效率问题, 因此在得到三种储能的功率变化曲线后需进行能量平衡调节。具体调节过程为: 由于超级电容承担的功率频次最高、电量最小, 首先对其功率 P_{sc} 进行调节, 调节量为 ΔE , 由式(19)计算得到。初始调节不能满足超级电容工况时, 由锂电池进行补偿, 得到超级电容器的参考功率 $P_{sc,h}$; 锂电池得到新的功率曲线, 若不能满足要求工况, 由压缩空气储能系统进行补偿, 得到锂电池的参考功率 $P_{ba,h}$; 同时压缩空气储能系统得到新的功率曲线, 若不能满足该系统工作要求, 则返回至风电和光伏发电环节, 调节可再生能源配置容量, 再重新计算上述过程, 如此反复迭代, 得到压缩空气储能系统的参考功率 $P_{ca,h}$ 。将三个参考功率曲线 $P_{sc,h}$ 、 $P_{ba,h}$ 和 $P_{ca,h}$ 当做信号, 通入建立的三个储能数学模型中, 进行储能系统的运行计算。

$$\begin{cases} \Delta E = E_{ch} \times \eta_{ch} \times \eta_{dis} - E_{dis} \\ E_{ch} = \sum P_{ch} \times \Delta T, E_{dis} = \sum P_{dis} \times \Delta T \end{cases} \quad (19)$$

式中, η_{ch} 和 η_{dis} 分别为储能系统充、放电效率; E_{ch} 和 E_{dis} 分别为储能系统在一个计算周期内的储能量和释能量; P_{ch} 和 P_{dis} 分别是储能功率和释能功率。

通过上述的功率分配计算, 得到每种储能系统各自的参考功率 P_h 。该参考功率 P_h 绝对值的最大值为该储能系统的额定功率 P_R 。分别对三个功率进行累计, 计算一个周期内的能量累计值 E_h , 则可由式(20)计算得到每种储能系统所需的额定容

量 E_R ，该容量值当做已知条件，进行三种储能系统的运行计算。

$$\begin{cases} E_h = \sum_{T=1}^{T=N} P_h \times \Delta T \\ E_R = \frac{E_{h\max} - E_{h\min}}{SOC_{\max} - SOC_{\min}} \end{cases} \quad (20)$$

式中， P_h 为每种储能的参考功率； ΔT 为时间步长； $E_{h\max}$ 和 $E_{h\min}$ 为能量累计值的最大值和最小值； SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为每种储能系统荷电状态 SOC 所允许的最大值和最小值。

为保证系统的连续性运行，储能系统需要满足典型日中储 / 释能量的平衡，即终了时的状态量不小于初始时的值。由于三种储能特性存在差异，本文统一用荷电状态 SOC 判断，其值分别由超级电容的电压，锂电池的电流和压缩空气储能的储气室气压计算得到。判断 SOC 是否满足要求，若不满足，返回至功率分配和能量平衡调节环节，重新进行计算，反复迭代，直至满足要求，具体计算过程如图 6 所示。

在上述要求满足后计算系统的供电可靠性，微电网系统中通常采用负荷缺电率进行评估^[40]，如式

(21) 所示，本文要求系统的负荷缺电率为零，即典型日中所有时刻均需要满足用户负荷。若满足该要求，结束计算过程，否则返回至初始状态，调节可再生能源配置容量，重新按所有流程计算。

$$f_{LSP} = \frac{\sum \{P_{load}(t) - [P_{DG}(t) + P_H(t)]\}}{\sum P_{load}(t)} \quad (21)$$

式中， $P_H(t)$ 为三种储能的功率之和， $P_{DG}(t)$ 为分布式可再生能源总发电功率（风电功率与光伏功率之和）， $P_{load}(t)$ 为负荷功率。

3 算例分析

3.1 计算条件

本文选取一个典型日中，某个确定的重要负荷的用电数据进行算例分析及研究。如图 7 中虚线所示为该用电负荷曲线，即风电、光伏和混合储能系统联合输出的供电曲线，其最大值 108 kW，出现在 18:00 时，全天总的用电量为 1712 kW·h。设计

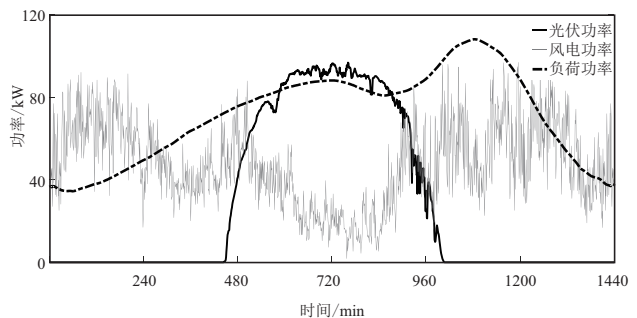


图 7 风电、光伏及负荷功率曲线
Fig.7 Curve of wind power, photovoltaic power and load

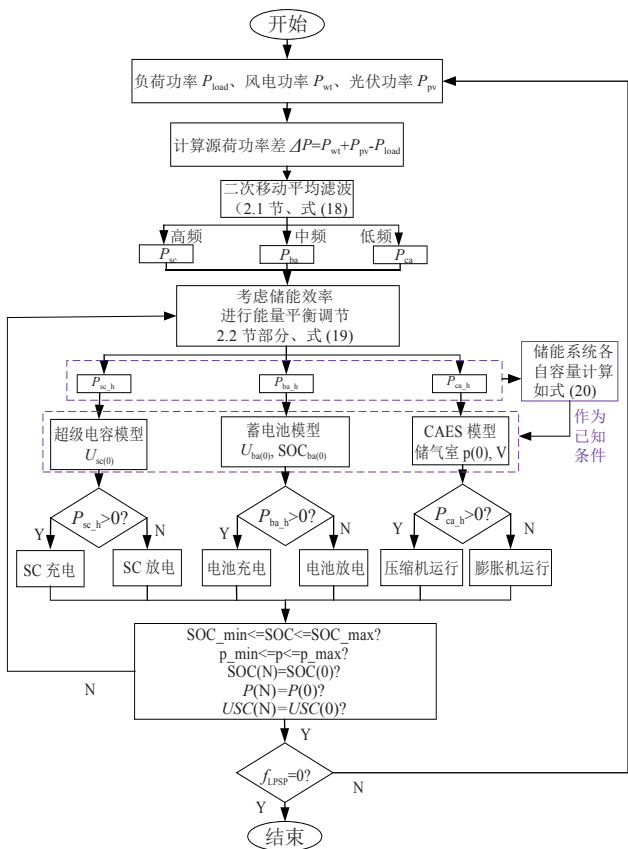


图 6 计算流程图
Fig.6 Calculation flow chart

表 1 储能系统主要参数

Table 1 Main parameters of energy storage system					
类型	主要参数	数值	类型	主要参数	数值
超级电容	效率	95%	压缩空气储能	总压比	100
	内阻 /Ω	0.002		总膨胀比	50
	容值 /F	233		压缩级数	4
	SOC 初值	0.4		膨胀级数	2
	SOC 范围	0.05~0.95		压缩机等熵效率	85%
锂电池	初始电压 /V	270		膨胀机等熵效率	85%
	效率	90%		储气室体积 /m ³	36
	内阻 /Ω	0.05		压力范围 /MPa	5-10
	容值 /F	1000		初始压力 /MPa	5.5
	SOC 初值	0.4		换热器效能	0.95
CAES	SOC 范围	0.2~0.8	环境参数	环境温度 /K	298
	初始电压 /V	300		换热系数 /(W·m ² ·K) ⁻¹	50

的储能系统初始状态值及主要的参数如表1所示。

选取某地实测分钟级风速和光照强度进行配置计算。经过上述方法计算得到风电装机容量为97.8 kW, 平均值为47.3 kW, 光伏发电装机容量为96 kW, 平均值为27.8 kW, 一个典型日可再生能源发电量为1802.4 kW·h。如图7所示为风电、光伏发电及负荷功率变化曲线图。

3.2 配置结果

为了计算更加精确, 同时适应超级电容和锂电池的响应时间, 将分钟级的数据转化为秒级, 认为在1 min内的每一秒功率值是恒定的。由此, 经过上述计算得到储能系统容量配置结果如表2所示, 超级电容额定功率为34.7 kW, 额定容量为1.9 kW·h, 由于超级电容承担的功率是高频次、短时间的部分, 因此需要的容量较小; 锂电池的额定功率为27.7 kW, 容量为30.6 kW·h, 由于锂电池不宜快速和频繁的充放电, 因此分配的功率和容量也较小; 压缩空气储能系统额定功率为53.9 kW, 容量为410 kW·h, 由于压缩空气储能系统适宜大容量、低频次的功率进行储/释能, 因此其承担了主要的电量。

如图8所示为经过计算分配得到的三种储能一天内的运行功率变化曲线及局部放大图, 可以看出, 超级电容充放电功率变化频次最高, 充放电持续时间很短, 因此需要的容量较小; 锂电池的充放电功率变化频率比超级电容小很多, 充放电持续时间相对较长, 弥补了超级电容的缺点, 减少其容量的配置。由于锂电池不宜瞬间大功率和频繁多次的充放电, 由超级电容承担此类功率, 因此减少了锂电池的充放电次数, 进而延长了其寿命; 黑色虚线为压缩空气储能系统的运行功率曲线, 该曲线最平滑, 适宜压缩机和膨胀机运行。其中大于零时压缩机运行, 储气室充气储能, 小于零时膨胀机运行,

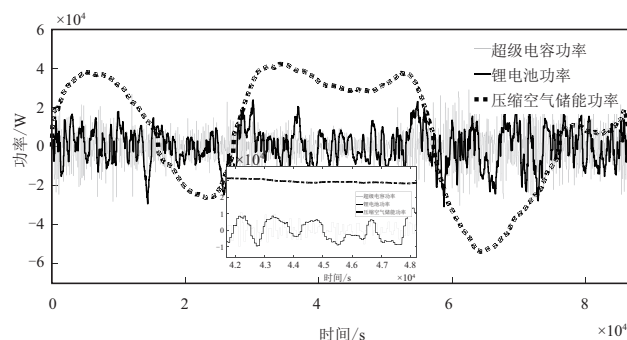


图8 三种储能系统功率变化曲线

Fig.8 Power curve of three energy storage systems

表2 储能系统配置结果

Table 2 Energy storage system configuration results

储能类型	额定功率/kW	额定容量/kW·h
超级电容	34.7	1.9
锂电池	27.7	30.6
压缩空气储能	53.9	410

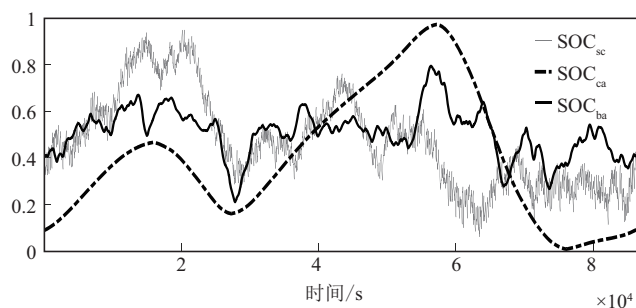


图9 三种储能系统SOC变化曲线

Fig.9 SOC curve of three energy storage systems

储气室放气释能; 同时, 压缩空气储能系统的持续运行时间最长, 压缩机总工作时间为15.6 h, 膨胀机工作时间为8.4 h。

如图9所示为三种储能系统荷电状态变化曲线, 可以看出, 超级电容的 SOC_{sc} 变化范围在0.05~0.95之间, 锂电池的 SOC_{ba} 在0.2~0.8之间, 压缩空气储能的 SOC_{ca} 在0~1之间, 三者均满足要求。为保证系统的连续性运行, 储能系统终了时的SOC值均需不小于初始状态。其中超级电容和锂电池的初始值为0.4, 终了时的SOC均略大于或等于0.4, 压缩空气储能系统的荷电状态初始值为0.1, 终了时的SOC值也为0.1, 均满足设计和连续运行要求。

SOC反映储能系统的剩余容量, 即实时的充放电能力, 超级电容出现776次充放电状态变化, 并出现多次满充和满放。锂电池在一天内有178次充放电状态改变, 但只有一次满充和满放, 即SOC达到最大值和最小值, 其他均为浅充浅放, SOC在0.5附近。压缩空气储能系统有4次状态改变, 储气室在一天内也只有一次满充和满放, 这对于储能系统寿命的延长和性能要求都是有利的。而且锂电池的SOC变化次数比超级电容少, 比压缩空气储能多, 体现了其在中间频段的功率的吞吐能力, 即锂电池较强的变工况能力, 既弥补了超级电容放电持续时间短的缺陷, 又补充了压缩空气储能系统变工况调节的需求。

3.3 储能系统运行特性分析

3.3.1 压缩空气储能运行特性

如图 10 所示为压缩空气储能系统质量流量变化曲线，其中，大于零的质量流量为压缩机系统质量流量，最大值为 0.075 kg/s，小于零的质量流量为膨胀机系统质量流量，最大流量为 0.1723 kg/s，其变化规律与压缩机和膨胀机功率变化规律相似。

如图 11 所示为压缩空气储能系统中储气室内气压和空气质量变化曲线。储气室气压初始值设定为 5.5 MPa，最大值和最小值分别为 10.0 MPa 和 5.09 MPa，满足设定的范围 5~10.1 MPa，运行结束时储气室气压为 5.5 MPa，满足连续运行的要求。储气室内空气质量变化与气压变化情况近似，在气压最高处空气质量最大为 4203 kg，最小值出现在气压最低处，其值为 2163 kg，但由于储气室内储/释气过程中，气体温度是变化的，因此两者的变化趋势并不完全固定和同步。

压缩空气储能系统在运行过程中的主要状态点的温度和气压如表 3 所示，其中 1、3、5、7 为四级压缩机进口状态点，由于空气在换热器内换热不充分，后三级进口温度高于第一级。2、4、6、8 为四级压缩机出口状态点，同样后三级出口温度略高于第一级。状态点 9、10 分别为储气室进口处

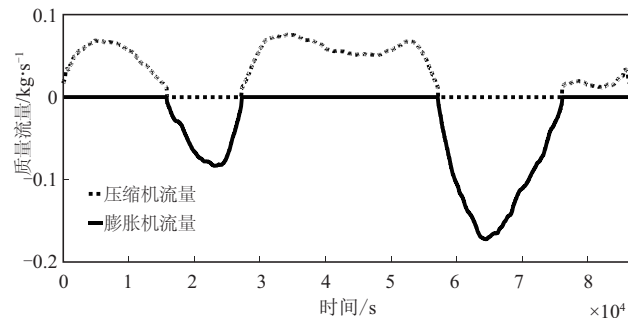


图 10 压缩空气储能系统质量流量变化曲线
Fig.10 Mass flow curve of compressed air energy storage system

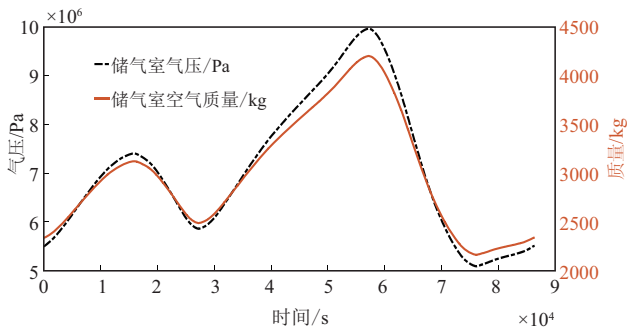


图 11 储气室压力和质量变化曲线
Fig.11 Pressure and mass curve of the gas storage chamber

表 3 压缩空气储能系统状态点参数
Table 3 Status point parameters of the compressed air energy storage system

状态点	温度 /K	压力 /MPa	状态点	温度 /K	压力 /MPa
1	298	0.101	9	305	10.1
2	434	0.319	10	298	5.05
3	304	0.319	11	428	5.05
4	444	1.01	12	272	0.714
5	305	1.01	13	427	0.714
6	445	3.19	14	271	0.101
7	305	3.19	15	298	0.101
8	445	10.1	16	435	0.101

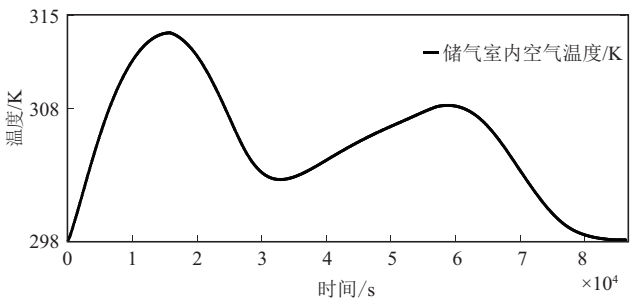


图 12 储气室内温度变化曲线
Fig.12 Temperature curve of the gas storage Chamber

和出口处，11、13 为膨胀机进口处，12、14 为膨胀机出口处，最终排气温度为 271 K。15、16 分别为蓄冷罐和蓄热罐处，温度分别为 298 K 和 435 K，其中蓄冷罐温度为环境温度，蓄热罐温度为压缩机侧四级换热器出口水温的平均值。

如图 12 所示为压缩空气储能系统的储气室内温度变化曲线，可以看出最高温度为 313 K，出现在第一次储气结束时，而并非在第二次长时间储气时段末，原因在于储气室会通过壁面散热，时间越长，散热量越大，温度变化越小。在一天结束时的温度为 298 K 左右，与初始时刻温度相等，满足储能系统连续性运行的要求。

压缩空气储能系统的效率为一个周期内释能量与储能量之比，系统中主要的能量损失包括压缩过程和膨胀过程的能量损失、换热器和储气室中的能量损失，通过计算得到本研究中压缩空气储能系统在一个周期内的系统效率为 56%。

3.3.2 锂电池和超级电容运行特性

如图 13 所示为锂电池电压和电流变化曲线，可以看出，锂电池的电压变化幅度较小，始终在 300 V 左右，锂电池的电流变化与功率变化情况相

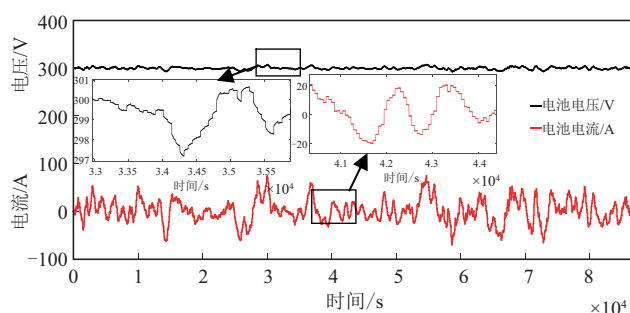


图 13 锂电池电压和电流变化曲线

Fig.13 Voltage and current curves of lithium battery

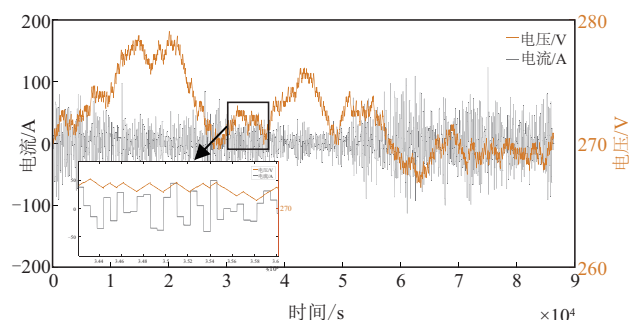


图 14 超级电容电压和电流变化曲线

Fig.14 Voltage and current changes of the supercapacitor

似, 充放电状态变化次数为 178 次, 最大充电电流为 79.8 A, 最大放电电流为 103.1 A。从局部图可以看出, 电压的变化特征符合电池的电压特性, 在充放电状态改变时, 电压发生突变, 随后由于极化现象产生极化电压, 使得电池端电压缓慢变化。

如图 14 所示为超级电容电压和电流变化曲线, 其中电流变化非常快, 共出现 776 次充放电状态的改变, 其中最大充电电流为 122.7 A, 最大放电电流为 112 A, 电流变化规律与超级电容功率变化相似。超级电容电压最大值为 278 V, 最小值为 267 V, 一天结束时的电压值略大于初始电压 270 V, 保证了连续性运行条件。从局部图可以看出, 在每个 60 s 内电压线性变化, 而且在充放电状态发生突变时, 由于超级电容内阻的影响, 电压会发生跳变。

4 结 论

本文提出一种集成分布式可再生能源 (风电和光伏) 的混合储能系统, 包括压缩空气储能、锂电池和超级电容器, 建立了三种储能系统的数学模型; 针对三种储能的不同特性, 提出了基于二次移动平均法滤波的功率分配方法以及基于能量平衡和连续性运行条件的储能容量配置计算方法。

开展了对某个实际用户用能的仿真分析。针对一个 108 kW 负荷的微电网系统, 计算得到了三种储能的额定功率和额定容量, 超级电容、锂电池和压缩空气储能的容量比约为 1:16:215。分析了三种储能系统的运行特性, 包括 SOC、电压、电流、压力、温度等主要参数的变化规律。在保证负荷缺电率为零时, 整个微电网系统的能量损失率约为 5%。

混合储能系统中, 压缩空气储能承担了主要的储 / 释能需求, 在一个周期内储 / 释能分别两次, 该周期起始和终了时刻储能状态平衡, 一个周期内的压缩空气储能系统效率为 56%。

本研究表明, 在分布式可再生能源微电网中, 多种储能技术耦合既能充分发挥每种储能的优势, 又可以通过相互配合弥补各自的劣势, 这对于可再生能源的充分利用和满足用电负荷的严苛需求具有重要的作用和意义, 在分布式能源利用领域具有较好的工程应用前景。

参 考 文 献

- [1] CUI M, JIE Z, CONG F, et al. Characterizing and analyzing ramping events in wind power, solar power, load, and netload[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 227-244.
- [2] 李翠萍, 卓君武, 李军徽, 等. 光伏发电与风光联合发电系统输出特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 95-102.
- [3] LI C P, ZHUO J W, LI J H, et al. Characteristic analysis of photovoltaic power generation and wind-photovoltaic joint power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 95-102.
- [4] 孟明, 陈世超, 赵树军, 等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
- [5] MENG M, CHEN S C, ZHAO S J, et al. Overview on research of renewable energy microgrid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [6] GHAZAL R, FEI G, RUSSELL N, et al. A generic microgrid controller: Concept, testing, and insights[J]. Applied Energy, 2018, 229: 660-671.
- [7] RUI X, DUAN Y, CAO J, et al. Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle[J]. Applied Energy, 2018, 217(1): 153-165.
- [8] 朱熹秋, 汤延祺. 飞轮储能关键技术及应用发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 265-268.
- [9] ZHU H Q, TANG Y Q. Key technologies and application trends of flywheel energy storage system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(1): 265-268.
- [10] SREEDHARAN P, FARBES J, CUTTER E, et al. Microgrid and renewable generation integration: University of California, San Diego[J]. Applied Energy, 2016, 169: 709-720.
- [11] 陈海生, 刘金超, 郭欢, 等. 压缩空气储能技术原理 [J]. 储能科学与技

- 术, 2013, 2(2): 146-151.
- CHEN H S, LIU J C, GUO H, et al. Technical principle of compressed air energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2013, 2(2): 146-151.
- [9] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(12): 85-89.
- ZHANG G J, TANG X S, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(12): 85-89.
- [10] JIAN C, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 27(1): 122-132.
- [11] 王利猛, 刘久成, 田春光, 等. 基于统计学方法的微网混合储能容量优化配置[J]. *电网技术*, 2018(1): doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0852.
- WANG L, LIU J, TIAN C, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage in microgrid based on statistic method[J]. *Power System Technology*, 2018 doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0852.
- [12] WANG G, CIOBOTARU M, AGEIDIS V G. Optimal capacity design for hybrid energy storage system supporting dispatch of large-scale photovoltaic power plant[J]. *Journal of Energy Storage*, 2015, 3: 25-35.
- [13] 李龙云, 胡博, 谢开贵, 等. 基于离散傅里叶变换的孤岛型微网混合储能优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 108-116.
- LI L Y, HU B, XIE K G, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in isolated microgrids based on discrete fourier transform[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 108-116.
- [14] 罗鹏, 杨天蒙, 姜素华, 等. 基于频谱分析的微网混合储能容量优化配置[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 376-381.
- LUO P, YANG T M, LOU S H, et al. Spectrum analysis based capacity configuration of hybrid energy storage in microgrid[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 376-381.
- [15] MESBAHI T, RIZOUG N, BARTHOLOMEUS P, et al. Optimal energy management for a Li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on particle swarm optimization incorporating nelder-mead simplex approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2017, PP(99): doi: 10.1109/TIV.2017.2720464.
- [16] 路小娟, 郭琦, 董海鹰. 基于 CMOPSO 的混合储能微电网多目标优化研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(1): 279-286.
- LU X J, GUO Q, DONG H Y. Multi objective optimization of hybrid energy storage micro grid based on CMOPSO algorithm[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2017, 38(1): 279-286.
- [17] 杨国华, 朱向芬, 周鑫, 等. 基于遗传算法的风电混合储能容量优化配置[J]. *电气传动*, 2015, 45(2): 50-53.
- YANG G H, ZHU X F, ZHOU X, et al. Hybrid energy storage capacity optimization for independent wind generation system based on genetic algorithm[J]. *Electric Drive*, 2015, 45(2): 50-53.
- [18] ABBASSI A, DAMI M A, JEMLI M. A statistical approach for hybrid energy storage system sizing based on capacity distributions in an autonomous PV/Wind power generation system[J]. *Renewable Energy*, 2017, 103(Complete): 81-93.
- [19] 王利猛, 刘久成, 田春光, 等. 基于统计学方法的微网混合储能容量优化配置[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 187-194.
- WANG L M, LIU J C, TIAN C G, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage in microgrid based on statistic method[J]. *Power System Technology* 2018, 42(1): 187-194.
- [20] ZHAO P, WANG M, WANG J, et al. A preliminary dynamic behaviors analysis of a hybrid energy storage system based on adiabatic compressed air energy storage and flywheel energy storage system for wind power application[J]. *Energy*, 2015, 84: 825-839.
- [21] 黄先进, 郝瑞祥, 张立伟, 等. 压缩空气与超级电容混合储能系统能量控制策略[J]. *北京交通大学学报*, 2014, 38(4): 56-62.
- HUANG X J, HAO R X, ZHANG L W, et al. Energy management of the hybrid energy storage system based on super-capacitors and compressed air[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2014, 38(4): 56-62.
- [22] 王成山, 武震, 杨献莘, 等. 基于微型压缩空气储能的混合储能系统建模与实验验证[J]. *电力系统自动化*, 2014, (23): 22-6.
- WANG C S, WU Z, YANG X, et al. Modeling and verification of hybrid energy storage system based on micro compressed air energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014(23): 22-6.
- [23] JACOB A S, BANERJEE R, GHOSH P C. Sizing of hybrid energy storage system for a PV based microgrid through design space approach[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 640-653.
- [24] SHARMA R K, MISHRA S. Dynamic power management and control of PV PEM fuel cell based standalone AC/DC microgrid using hybrid energy storage[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, PP(99): 1-1.
- [25] THOINTHONG P, SIKKABUT S, MUNGPORN P, et al. Performance investigation of high-energy high-power densities storage devices by Li-ion battery and supercapacitor for fuel cell/photovoltaic hybrid power plant for autonomous system applications[C]//*Proceedings of the Industry Applications Society Meeting, USA*, 2015.
- [26] 田崇翼, 李珂, 严毅, 等. 基于经验模式分解的风电场多时间尺度复合储能控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2167-2172.
- TIAN C Y, LI K, YAN Y, et al. A multi-time scale control strategy of hybrid energy storage system in wind farm based on empirical mode decomposition[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2167-2172.
- [27] 田崇翼, 张承慧, 李珂, 等. 含压缩空气储能的微网复合储能技术及其成本分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 10: 36-41.
- TIAN C Y, ZHANG C H, LI K, et al. Composite energy storage technology with compressed air energy storage in microgrid and its cost analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 10: 36-41.
- [28] 张远, 杨科, 李雪梅, 等. 基于先进绝热压缩空气储能的冷热电联产系统[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(11): 1991-1996.
- ZHANG Y, YANG K, LI X M, et al. A combined cooling, heating and power system based on advanced adiabatic compressed air energy storage technology[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(11): 1991-1996.
- [29] 韩中合, 刘士名, 周权, 等. 恒壁温储气模型下先进绝热压缩空气储能系统性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12): 3373-3380.

- HAN Z H, LIU S M, ZHOU Q, et al. Performance analysis of AA-CAES system with constant wall-temperature air storage model[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3373-3380.
- [30] LI S, CHENG X. A comparative study on RC models of lithium-ion battery[J]. Proceedings of the Transportation Electrification Asia-Pacific, F, 2014: 1-4.
- [31] 李百华, 郭灿彬, 钟其水, 等. 电动汽车锂电池戴维南等效电路模型参数辨识研究[J]. 微型机与应用, 2017, 36(1): 83-85.
- LI B H, GUO C B, ZHONG Q S, et al. Research on parameter identification of Thevinin equivalent circuit model about electric vehicle lithium-ion battery[J]. Microcomputer & Its Applications, 2017, 36(1): 83-85.
- [32] DANG X, LI Y, KAI X, et al. Open-circuit voltage-based state of charge estimation of lithium-ion battery using dual neural network fusion battery model[J]. Electrochimica Acta, 2016, 188: 356-366.
- [33] HAO M, RUI X. Chapter 1 – Modeling, evaluation, and state estimation for batteries[J]. Modeling Dynamics & Control of Electrified Vehicles, 2018, 1-38.
- [34] 单金生, 吴立峰, 关永, 等. 超级电容建模现状及展望[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(8): 9-14.
- SHAN J S, WU L F, GUAN Y, et al. Review and expectation of modeling research on supercapacitor[J]. Electronic Components & Materials, 2013, 32(8): 9-14.
- [35] ZHANG X, XUE H, XU Y, et al. An investigation of an uninterruptible power supply (UPS) based on supercapacitor and liquid nitrogen hybridization system[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 85(9): 784-792.
- [36] 金英华. 超级电容器的性能研究与状态分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- JIN Y H. Performance research and state analysis of supercapacitors[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [37] GENG S, LIU Y, CHAI R, et al. Online model parameter identification for supercapacitor based on weighting bat algorithm[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 87: 113-118.
- [38] 陈跃燕, 李相俊, 韩晓娟, 等. 基于移动平均法和风电波动率约束的电池储能系统平滑风电出力控制策略[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 1-5.
- CHEN Y Y, LI X J, HAN X J, et al. Control strategy of smoothing wind power output using battery energy storage based on moving average method and wind power volatility rate constraint[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 1-5.
- [39] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- PEI Y X, GUO M. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2001(1): 21-23.
- [40] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98.
- XU L, RUAN X B, ZHANG B H, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.