

基于模糊控制算法和布谷鸟搜索算法的混合储能系统优化配置

重点研究将混合储能系统应用于平滑可再生能源系统输出波动场景下的优化配置问题。首先，建立可再生能源输出波动的平滑目标并选取Savitzky-Golay滤波算法以平滑多种新能源的出力。继而，分析功率型储能和能量型储能各自的特点，论证混合储能的互补性。然后，建立混合储能系统优化配置模型，并结合实际算例，采用上述滤波算法对新能源出力进行滤波，高频部分由储能系统补偿。对储能系统补偿的功率，采用模糊控制算法对不同的储能介质进行功率分配，再用布谷鸟搜索算法确定最优的储能额定功率和额定容量。仿真结果验证了所述算法的有效性。

曲春辉 孙文文/中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室
陶思钰 徐青山/东南大学电气工程学院

0 引言

在化石能源消耗殆尽和环境污染日益加重的双重压力下，包含可再生能源的分布式发电技术的研究受到了国内外学者的广泛关注。由于可再生能源发电系统输出功率的随机性和间歇性，为了保障微电网的安全稳定运行以及减少对大电网的冲击，储能装置成了解决这一问题的方案^[1]。储能可在可再生能源发电系统中的控制目标，主要可以分为两类：①配合可再生能源发电的有功输出，平滑其功率波动，以减小对电网的冲击；②结合可再生能源发电预测，使其出力按照预测曲线推进，从而实现计划发电。本文对于储能的优化配置，采

用的是基于目标①——平滑可再生能源输出波动。

对于混合型储能系统的优化配置，文献[2]将蓄电池储能应用于大型风电场短时功率波动的平滑，提出了一种基于蓄电池荷电状态的反馈控制策略，应用结果表明该方法可以减小功率波动，但由于直接对通过滤波算法获得的储能装置输出功率值进行修改，导致整体的平滑效果较差。文献[3]发展了传统的低通滤波方法，提出了一种滤波常数可变的储能平滑功率波动方法。该方法应用储能装置补偿可再生能源出力某一特定频率范围内的波动，同时根据储能的荷电状态对滤波常数进行调整，从而实时调节储能装置的输出大小，获得了较好的平滑效果。文献[4]采用普通移动平均滤波算法对光伏发电系统的输出功率进行滤波，滤除的波动功率由储能装置吸收。文献[3]和文献[4]采用的滤波算法计算出的目标值对于前一时刻可再生能源的输出功率值具有很强的依赖性，当可再生能源出力出现骤变时，滤波性能则会大幅下降，并且对后续的平滑效果造成不利影响。文献[5]针对光伏发电和风力发电大规模接入电网时造成的功率波动问题，提出了一种波动率智能化分段技术，结合储能装置的荷电状态反馈控制，改善了基于低通滤波算法的储能平滑功率波动的不足。文献[6]针对储能装置运行过程中容易出现荷电状态越限的情况，采集储能装置当前的荷电状态通过模糊控制算法实现对其充放电功率的



曲春辉/高级工程师

关键词/Keywords

Savitzky-Golay滤波法 ·
功率型储能系统 ·
能量型储能系统 ·
模糊控制算法 ·
布谷鸟搜索算法 ·

国家电网公司科技项目“多业态生态开发区可再生能源综合开发与利用技术研究”(NYB17201700141)

调整,有效防止了储能装置运行时过充电或过放电。文献[2-6]研究了储能系统对可再生能源输出功率波动的平滑效果和控制策略,但没有涉及储能容量的确定或优化。

针对上述文献中所存在的不足提出混合容量优化方法,本文结合了Savitzky-Golay滤波法,具有在滤除噪声的同时确保信号的形状、宽度不变的优点,以基于Savitzky-Golay滤波法对可再生能源输出功率的频谱进行分析的结果为基础,并针对混合储能系统的充放电过程需兼顾两种不同储能介质的荷电状态,不便于精确地给出功率分配的比例系数问题,采用模糊控制算法对不同的储能介质进行功率分配。同时,布谷鸟搜索算法相较其他优化算法,具有参数少、易实现、随机搜索路径优和寻优能力强等优点,运用布谷鸟搜索算法确定最优的储能额定功率和额定容量,给出满足经混合储能系统补偿后的目标功率输出波动率约束下的系统初始投资成本最小容量方案。

1 可再生能源输出波动的平滑

1.1 平滑目标

为了评价储能系统的补偿效果,引入输出功率的波动率。假设在 T 时间段内的功率波动率为 R ,则功率波动率的计算公式为

$$R = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_N} \times 100\% \quad (1)$$

$$= \frac{\max(P_1, P_2, \dots, P_n) - \min(P_1, P_2, \dots, P_n)}{P_N} \times 100\%$$

式中, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 为 T 时间段内的可再生能源输出功率, kW; $P_{\max}$ 为 T 时间段内的可再生能源输出功率的最大值, kW; $P_{\min}$ 为 T 时间段内的可再生能源输出功率的最小值, kW; P_N 为可再生能源发电系统的额定功率, kW。

R 越大,表示 T 时间段内的可再生能源的功率波动越大。所以混合储能系统对于可再生能源出力的平滑目标就是最小化 R 的值。

1.2 Savitzky-Golay滤波法

Savitzky-Golay滤波法(以下简称“S-G

法”)由Savitzky和Golay于1964年提出,之后被广泛地运用于数据流平滑除噪,其最大的特点在于在滤除噪声的同时可以确保信号的形状和宽度不变。采用S-G法平滑可再生能源输出功率的步骤如下^[7]。

在可再生能源输出功率采样数据中取 N_2 (奇数)个数据构成一组数列,设这组数列为 $x(n)$,以 $n=0$ 为中心,则 n 的取值范围为 $[-(N_2-1)/2, (N_2-1)/2]$,可用如下多项式来拟合,即

$$y(n) = c_0 + c_1 n + c_2 n^2 + \dots + c_K n^K = \sum_{k=0}^K c_k n^k \quad (2)$$

最小二乘拟合的残差为

$$\varepsilon = \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} [y(n) - x(n)]^2$$

$$= \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} \left| \sum_{k=0}^K c_k n^k - x(n) \right|^2 \quad (3)$$

若要使 ε 最小,则应满足

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c_i} = \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} 2n^i [y(n) - x(n)]$$

$$= \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} 2n^i \left| \sum_{k=0}^K c_k n^k - x(n) \right| = 0 \quad (4)$$

化简后可得

$$\sum_{k=0}^K \left| \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} n^{i+k} \right| c_k = \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} n^i x(n) \quad i=0, 1, \dots, K \quad (5)$$

由这 $K+1$ 个方程,构成 $K+1$ 元线性方程组,解这个方程组就可以求出多项式系数。首先引入一个 N_2 行、 $K+1$ 列的辅助矩阵 A ,即

$$A = \{a_{n,i}\}, \quad a_{n,i} = n^i, \quad 0 \leq i \leq K \quad (6)$$

$$-(N_2-1)/2 \leq n \leq (N_2-1)/2$$

再设一个辅助矩阵 B

$$B = A^T A \quad (7)$$

容易计算得到

$$b_{i,k} = \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} a_{i,n} a_{k,n} = \sum_{n=-(N_2-1)/2}^{(N_2-1)/2} n^{i+k} \quad (8)$$

令

$$x = \begin{bmatrix} x[-(N_2-1)/2] \\ \vdots \\ x[(N_2-1)/2] \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a(0) \\ \vdots \\ a(K) \end{bmatrix} \quad (9)$$

可以得到

$$Ba = A^T A a = A^T x \quad (10)$$

从而有

$$a = (A^T A)^{-1} A^T x = Hx \quad (11)$$

向量 a 即为多项式的系数,求得多项式的各个系数后,将中间数据的横坐标代入即可求得滤波后的值。这里中间数据的横坐标为 $n=0$,代入后可得

$$y(0) = a_0 \quad (12)$$

因此向量 a 的第一个元素即为所求的滤波后的值,直接选取采样数据的第一个数作为首端的补充数据,选取最后一个数作为尾端的补充数据。储能所需容量和输出功率波动率与用于计算的点数 N_2 以及多项式的阶数 K 有关。当阶数 K 确定后,可以通过试差法不断增大用于计算的点数 N_2 的值,直到满足功率波动率约束为止。

2 混合储能系统

2.1 功率型储能与能量型储能对比

选取超级电容器作为功率型储能介质,选取锂电池作为能量型储能介质,构成混合储能系统,并对超级电容器和锂电池的各方面指标参数进行比较。从性能参数上看,超级电容器的功率密度高,比锂电池的功率密度水平高得多,但其能量密度低,循环寿命长,对过充电和过放电的承受能力比较好,充放电效率高^[8]。锂电池的能量密度高而功率密度低,循环寿命短,对充放电方式较为敏感,过充电、过放电或者大功率充放电会影响其使用寿命,而且充放电效率相对较低^[9]。

2.2 混合储能系统优化配置

为了使储能系统能更好地应用于平滑可再生能源输出功率波动,本文考虑将功率型储能介质

和能量型储能介质结合构成混合储能系统,并进行优化配置,以实现优势互补。

(1) 系统优化目标

将储能系统应用于平滑可再生能源输出功率波动,需要使平滑后的目标功率输出满足给定的功率波动率约束。若储能系统的额定功率和额定容量设置的过小,则平滑后的目标功率输出无法满足功率波动率约束;若储能系统的额定功率和额定容量设置的过大,则会造成不必要的成本增加。系统的优化目标为在满足功率波动率约束的条件下,使储能系统的成本最低。

1) 目标函数

$$\min C_{\text{total}} = C_1 P_{\text{ESN1}} + C_2 E_{\text{ESN1}} + C_3 P_{\text{ESN2}} + C_4 E_{\text{ESN2}} \quad (13)$$

式中, C_{total} 为混合储能系统的总成本,\$;\$ P_{ESN1} 、 P_{ESN2} 分别为超级电容器和锂电池的额定功率,kW; E_{ESN1} 、 E_{ESN2} 分别为超级电容器和锂电池的额定功率,kW·h; C_1 、 C_3 分别为超级电容器和锂电池的单位功率价格,\$/kW; C_2 、 C_4 分别为超级电容器和锂电池的单位容量价格,\$/kW·h。

2) 约束条件

$$\begin{cases} -P_{\text{ESN1}} \leq P_{\text{cap}} \leq P_{\text{ESN1}} \\ -P_{\text{ESN2}} \leq P_{\text{bat}} \leq P_{\text{ESN2}} \\ \text{SOC}_{\text{cap-min}} \leq \text{SOC}_{\text{cap}} \leq \text{SOC}_{\text{cap-max}} \\ \text{SOC}_{\text{bat-min}} \leq \text{SOC}_{\text{bat}} \leq \text{SOC}_{\text{bat-max}} \end{cases} \quad (14)$$

式中, P_{cap} 为分配给超级电容器的功率,kW; P_{bat} 为分配给锂电池的功率,kW; SOC_{cap} 、 SOC_{bat} 分别为超级电容器和锂电池的荷电状态; $\text{SOC}_{\text{cap-min}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{cap-max}}$ 分别为超级电容器的荷电状态上限和荷电状态下限; $\text{SOC}_{\text{bat-min}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{bat-max}}$ 分别为锂电池的荷电状态上限和荷电状态下限。

(2) 功率优化分配

混合储能系统应用于平滑可再生能源输出功率波动时,混合储能系统补偿的总功率需要在超级电容器和锂电池之间分配。本文对混合储能系统补偿功率给出如下分配原则:充电时,优先考虑由超级电容器进行充电,仅当超级电容器荷电状态过高或锂电池荷电状态过低时,由锂电池优先进行充电;放电时,仍优先考虑由超级电容

器进行放电，仅当超级电容器荷电状态过低或锂电池荷电状态过高时，由锂电池优先进行放电。功率分配过程中，两种储能介质的荷电状态必须满足荷电状态约束。由于精确的功率分配系数难以确定，模糊控制给出了很好的解决方案^[10]。

第 t 个时刻混合储能系统所需补偿的总功率可按如下公式计算，即

$$P_{\text{ES-total}}(t) = P_G^*(t) - P_G(t) \quad (15)$$

式中， $P_G^*(t)$ 为第 t 个时刻的目标输出功率，kW； $P_G(t)$ 为第 t 个时刻的可再生能源初始输出功率，kW； $P_{\text{ES-total}}(t) > 0$ 表示混合储能系统放电， $P_{\text{ES-total}}(t) < 0$ 表示混合储能系统充电。

超级电容器和锂电池的补偿功率可以按如下公式计算，即

$$P_{\text{cap}}(t) = D(t)P_{\text{ES-total}}(t) \quad (16)$$

$$P_{\text{bat}}(t) = [1 - D(t)]P_{\text{ES-total}}(t) \quad (17)$$

式中， $D(t)$ 为第 t 个时刻混合储能系统的功率分配系数。

本文以超级电容器的荷电状态 $\text{SOC}_{\text{cap}}(t)$ 作为模糊控制器的一个输入量，记为 $X_1(t)$ ；以锂电池的荷电状态 $\text{SOC}_{\text{bat}}(t)$ 作为模糊控制器的另一个输入量，记为 $X_2(t)$ 。

$X_1(t)$ 和 $X_2(t)$ 的表达式为

$$X_1(t) = \text{SOC}_{\text{cap}}(t) \quad (18)$$

$$X_2(t) = \text{SOC}_{\text{bat}}(t) \quad (19)$$

以第 t 个时刻混合储能系统的功率分配系数 $D(t)$ 作为模糊控制器的输出量。

首先确定模糊控制器的输入输出隶属度函数。混合储能系统补偿功率为负时，即储能系统充电时，输入输出的隶属度函数如图1~图3所示。

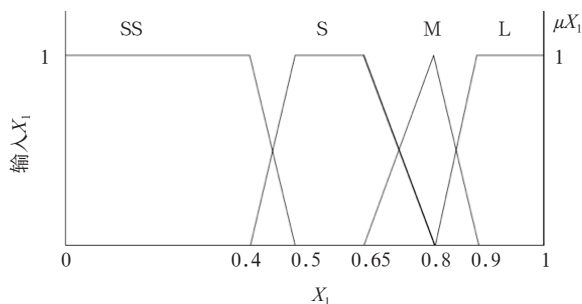


图1 充电时输入 X_1 的隶属度函数

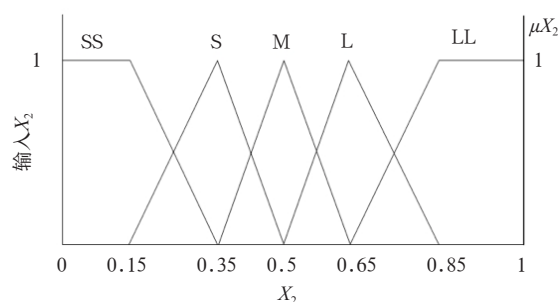


图2 充电时输入 X_2 的隶属度函数

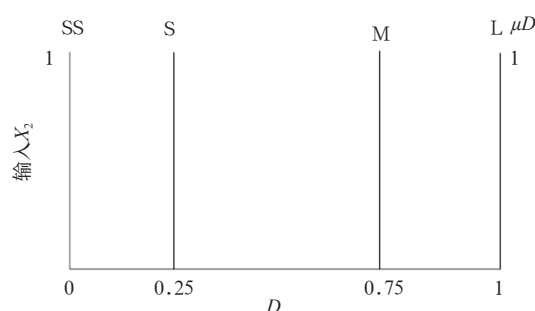


图3 充电时输出 D 的隶属度函数

混合储能系统补偿功率为正时，即储能系统放电时，按照之前制定的充放电原则，应该提高超级电容器的放电优先级，输入 X_2 和输出 D 的隶属度函数不变，输入 X_1 的隶属度函数如图4所示。

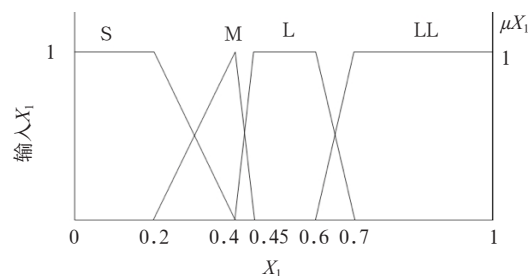


图4 放电时输入 X_1 的隶属度函数

当混合储能系统充电时，优先考虑由超级电容器进行充电，仅当超级电容器荷电状态过高或锂电池荷电状态过低时，才考虑由锂电池优先进行充电。根据以上原则，制定充电时的模糊控制规则如表1所示。

表1 充电时的模糊控制规则

X_1	X_2				
	SS	S	M	L	LL
SS	L	L	L	L	L
S	M	L	L	L	L
M	SS	SS	SS	S	M
L	SS	SS	SS	SS	S

当混合储能系统放电时，仍然优先考虑由超级电容器进行放电，仅当超级电容器荷电状态过低或锂电池荷电状态过高时，才考虑由锂电池优先进行放电。根据以上原则，制定放电时的模糊控制规则如表2所示。

表2 放电时的模糊控制规则

X_1	X_2				
	SS	S	M	L	LL
S	S	SS	SS	SS	SS
M	M	S	SS	SS	SS
L	L	L	L	L	M
LL	L	L	L	L	L

确定了输入输出的隶属度函数和模糊控制规则后，根据超级电容器和锂电池的实际荷电状态值，计算得到功率分配系数的模糊值，还需要进行解模糊计算。这里采用加权平均法解模糊，则功率分配系数的实际值可以用如下公式计算，即

$$D(t) = \frac{\sum_i \sum_j \mu_{1i}[X_1(t)] \mu_{2j}[X_2(t)] D_{ij}}{\sum_i \sum_j \mu_{1i}[X_1(t)] \mu_{2j}[X_2(t)]} \quad (20)$$

式中， $\mu_{1i}[X_1(t)]$ 、 $\mu_{2j}[X_2(t)]$ 分别为输入变量 $X_1(t)$ 的第*i*个隶属度值和输入变量 $X_2(t)$ 的第*j*个隶属度值；*j*为集合{SS, S, M, L, LL}中的元素；充电时，*i*为集合{SS, S, M, L}中的元素，放电时，*i*为集合{S, M, L, LL}中的元素； D_{ij} 是输入为 $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$ 时计算得到的模糊输出量。

上述功率分配过程没有考虑超级电容器和锂电池的功率约束和荷电状态约束，实际功率分配过程应该对模糊控制器计算得到的参考功率进行修正。

考虑额定功率约束和荷电状态约束后，混合储能系统的功率分配策略流程图如图5所示。

(3) 优化求解算法

布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search Algorithm, CSA)^[11-12]是由Yang等人于2009年最早提出的一种新型智能优化算法，该算法具有参数设置少、全局搜索性强及收敛速度快等优点，相较传统的优化算法具有更高的巡游性能，因而被广泛应用于

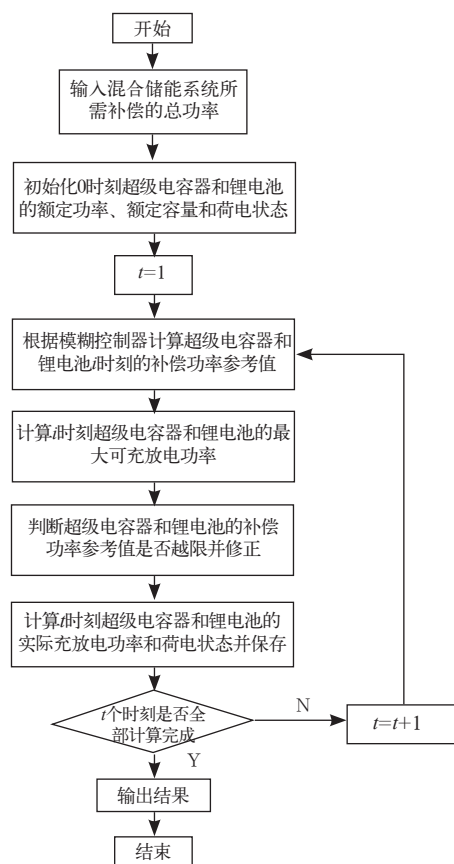


图5 混合储能系统的功率分配策略流程图

工程优化领域。

CSA算法的基本原理^[13]是受布谷鸟寄生孵育雏鸟的现象启发而设计的一种基于莱维飞行搜索机制的优化算法。莱维飞行是一类非高斯随机过程，其平稳增量服从Levy稳定分布，其飞行步长满足一个重尾的莱维稳定分布。在飞行过程中，步长较小的短距离行走与偶尔较大步长的长距离行走相互交替。据研究表明，莱维飞行是最有效、最理想的搜索策略。

在该算法中，鸟巢位置按照如下搜索方式进行更新，即

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \alpha \oplus \text{Levy}(\lambda) \quad (21)$$

$$\alpha = \alpha_0 [X_i(t) - X_{\text{best}}] \quad (22)$$

$$\text{Levy}(\lambda) = \frac{u}{|v|} \quad (23)$$

$$u \sim N(0, \delta_u^2) \quad (24)$$

$$v \sim N(0, 1) \quad (25)$$

$$\delta_u = \left\{ \frac{\Gamma(\lambda) \sin(\pi(\lambda-1)/2)}{\Gamma[(\lambda)/2] (\lambda-1) 2^{(\lambda-2)/2}} \right\}^{1/(\lambda-1)} \quad (26)$$

式中, $X_i(t)=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $i=1, 2, \dots, m$ 表示第 i 个鸟巢在第 t 代的位置; n 为优化问题的维数; m 为每一代的鸟巢个数; α 为步长因子, 用于控制随机搜索的范围, α_0 为常数, 通常取 0.01, X_{best} 为当前最优解; 符号 $\oplus$ 表示点对点乘法; $\text{Levy}(\lambda)$ 为服从参数 $\lambda(1 < \lambda \leq 3)$ 的莱维飞行产生的一个随机搜索向量。

3 算例分析

算例旨在验证所提出的用模糊控制算法对混合储能系统进行功率优化分配, 并用布谷鸟搜索算法确定各储能介质的额定功率和额定容量的方法的有效性。本算例采用的仿真数据由 Trnsys 和 HOMER 等软件模拟生成, 将 Trnsys 软件中江苏某地的风、光资源输入到 HOMER 软件, 再用 HOMER 软件模拟生成风力、光伏发电全年的输出功率离散数据。采样周期为 1 min, 其中风力发电系统的额定功率为 1 000 kW, 光伏发电系统的额定功率为 200 kW。

超级电容器和锂电池的各项参数指标如表 3 所示。

表3 各储能介质的参数

参数	超级电容器	锂电池
功率单价/(\$/kW)	300	1 500
能量单价/(\$/kW·h)	3 000	1 000
初始荷电状态 (%)	50	50
荷电状态上限 (%)	90	90
荷电状态下限 (%)	10	10

采用 S-G 四阶平滑滤波前后的可再生能源输出功率曲线, 如图 6 所示。

平滑时间窗口取 20 min 时, 可再生能源初始输出功率波动率为 25.72%, 滤波后目标输出功率波动率为 9.97%。

用模糊控制法对混合储能系统进行功率分配, 首先用布谷鸟搜索算法求解最优额定功率和

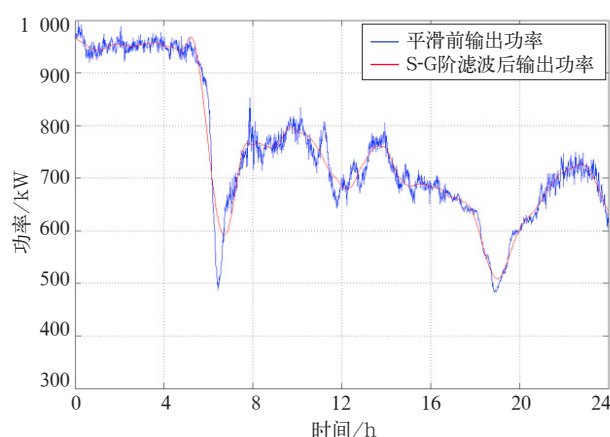


图6 滤波前后可再生能源输出功率曲线

额定容量。计算结果如表 4 所示。

表4 布谷鸟搜索算法求解最优配置结果

参数	超级电容器	锂电池	混合储能系统
额定功率/kW	103.589	40.766 6	144.355 6
额定容量/kW·h	43.130 2	16.173 8	59.304
成本/\$	156 921.9	77 323.7	234 245.6
充放电次数	1 440	165	1 440
充放电状态变换次数	410	10	410

图 7、图 8 分别为布谷鸟搜索算法下模糊控制求得的超级电容器和锂电池一天内的补偿功率。超级电容器和锂电池的额定功率计算结果分别为 103.589 kW 和 40.766 6 kW。

从图 7、图 8 中可以看出, 超级电容器和锂电池各个时刻的补偿功率都在功率约束范围内, 没有越限。通过观察可以发现, 超级电容器和锂电池的补偿功率都曾达到过额定功率, 反映出布谷鸟搜索算法计算的最优额定功率的有效性, 因为若额定功率取得再小一点, 可能就会发生功率越限。一天中, 超级电容器的充放电次数为 1 440 次, 锂电池的充放电次数为 165 次, 混合储能系统的充放电次数为 1 440 次。统计一天中超级电容器和锂电池的充放电状态变换次数, 超级电容器为 410 次, 而锂电池为 10 次, 混合储能系统为 410 次, 反映出模糊控制算法的有效性。

图 9、图 10 分别为布谷鸟搜索算法计算得到的

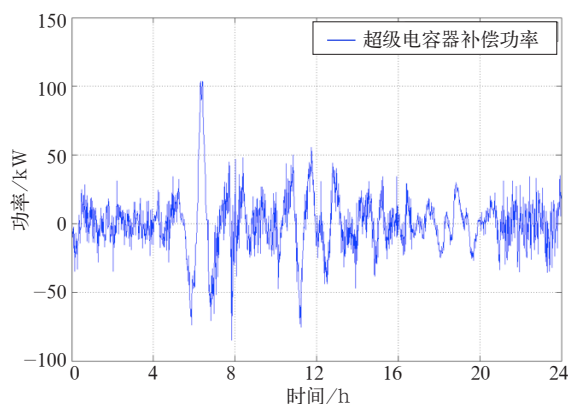


图7 超级电容器补偿功率

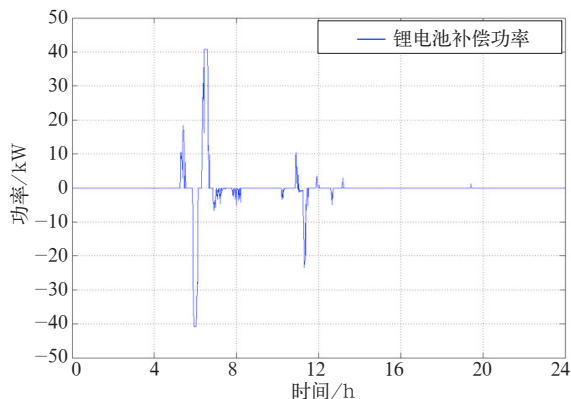


图8 锂电池补偿功率

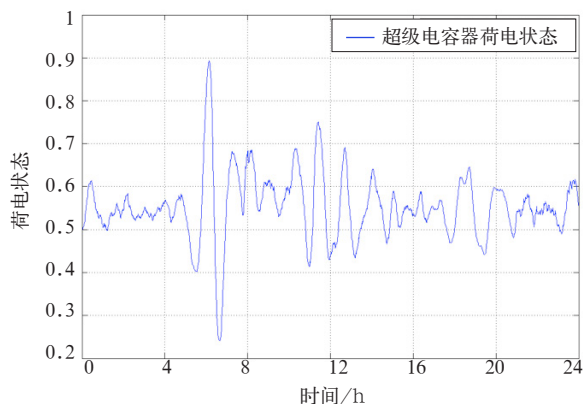


图9 超级电容器荷电状态变化

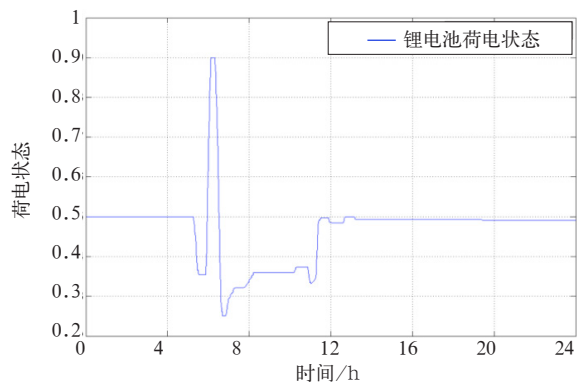


图10 锂电池荷电状态变化

超级电容器和锂电池在一天中荷电状态的变化。

从图9、图10中可以看出,布谷鸟搜索算法和模糊控制算法计算得到的各储能介质的荷电状态都满足约束条件,没有越限。锂电池曾达到过荷电状态上限,而超级电容器也曾达到非常接近荷电状态上限的值,可以反映出布谷鸟搜索算法计算额定容量的有效性,因为若各储能介质的额定容量取得再小一些,就可能发生荷电状态越限。因此,布谷鸟搜索算法计算出的储能最优配置是有效的。

4 结束语

所提出的模糊控制算法既保证了各个储能介质的功率约束,又能减少能量型储能介质的充放电次数,提高了能量型储能介质的寿命,而且充分发挥了功率型储能介质和能量型储能介质各自的优势,验证了模糊控制算法的有效性。通过算例分析还可以看出,超级电容器和锂电池的补偿功率都曾达到过额定功率,而锂电池曾达到过荷电状态上限,由此可以看出布谷鸟搜索算法配置的最优额定功率和额定容量的有效性。

参考文献

- [1] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
- [2] Yoshimoto K, Nanahara T, Koshimizu G. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006 IEEE PE, Atlanta, GA, 2006.
- [3] 张野,郭力,贾宏杰,等.基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J].电力系统自动化,2012(6):34-38.
- [4] Tesfahunegn S G, Ulleberg O, Vie P, et al. Optimal shifting of photovoltaic and load fluctuations from fuel cell and electrolyzer to lead acid battery in a photovoltaic/hydrogen standalone power system for improved performance and life time[J].

(下转第47页)

表2 电晕放电电流测试结果

风速 /(m/s)	放电电流 / μ A	风速 /(m/s)	放电电流 / μ A
0	305	5.0	399
1.0	324	5.9	417
2.1	342	6.1	439
3.0	363	7.1	461
4.2	380	8.0	483

所受力的角度出发,并通过研究电晕放电发生时单位体积内粒子数目的增减,计算了电晕放电电流的微观表达式。从该表达式的计算过程中可以发现,电晕放电受大气气压、环境温度和风速等多种因素制约。通过电晕放电电流的微观公式、宏观表达式以及电晕放电电流的测试实验,得到风速的大小影响电晕放电电流的大小,风速越大电晕放电电流越大。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出

版社, 2015.

- [3] Khalifa M M, Morris R M. A laboratory study of the effects of wind in DC corona[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(3): 290-298.
- [4] Hara M, Hayashi N, Shiotsuki K, et al. Influence of wind and conductor potential on distributions of electric field and ion current density at ground level in DC high voltage line to plane geometry[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(4): 803-814.
- [5] 汪泓, 李敏, 吕建红, 等. 风速对特高压直流输电线路离子流场分布的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2897-2901.
- [6] Joseph E Nanevicz. Static charging and its effects on avionic Systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, EMC-24(2): 203-209.
- [7] Cobine J D. Gaseous Conductors[M]. 2nd ed. New York: Dover Publications Inc, 1958.

(收稿日期: 2018-06-21) **EA**

(上接第22页)

- Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 10401-10414.
- [5] 单茂华, 李陈龙, 梁廷婷, 等. 用于平滑可再生能源出力波动的电池储能系统优化控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 469-477.
- [6] Ise T, Kita M, Taguchi A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
- [7] 蔡天净, 唐瀚. Savitzky-Golay平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011, 38(1): 63-68, 82.
- [8] 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(1): 19-22.
- [9] 邓颖, 袁野, 张霞. 大容量锂电池在分布式储能

系统中的应用和前景[J]. 现代机械, 2015(6): 83-86.

- [10] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6, 184.
- [11] Yang X S, Deb S. Cuckoo search via levy flights[C]. NaBic 2009: Proceedings of World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, Coimbatore, India, 2009: 210-214.
- [12] Gandomi A H, Yang X S, Alavi A H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems[J]. Engineering with Computers, 2013, 29(2): 245.
- [13] 兰少峰, 刘升. 布谷鸟搜索算法研究综述[J]. 计算机工程与设计, 2015(4): 1063-1067.

(收稿日期: 2018-08-02) **EA**