基于费用效率法的风电场混合储能容量优化配置

栗 然，党 磊，周鸿鹊，董 哲

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，河北 保定 071003)

摘要：复合多种类型储能装置是储能用于风电波动平抑的主要发展方向之一。针对复合超级电容器和多种介质蓄电池为例，研究其储能容量优化配置方法。由于风电出力具有非平稳性，因此首先采用经验模态分解(EMD)分割平抑任务，然后利用互补平抑实现储能装置优势互补，最后综合考虑风电平抑度、平抑方案经济性和储能装置寿命三方面因素，建立以费用效率(*CE*)为目标函数，用雨流计数法统计寿命折损的混合储能定容优化模型。利用所建模型分析了适当允许过充过放是否能够提高平抑方案的经济性和平抑能力。验证了多种介质蓄电池在合理的配置方案下联合超级电容器平抑波动，相较单种介质蓄电池能增加单位投资的平抑能力。

关键词：经验模态分解(EMD)；互补平抑；费用效率(*CE*)；雨流计数法；过充过放

Capacity optimization disposition of hybrid energy storage in wind field based on cost efficiency model

LI Ran, DANG Lei, ZHOU Honghu, DONG Zhe

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Composite energy storage device is the future development direction of energy storage in stabilizing the wind power fluctuations. This paper takes composite super capacitor and different battery media for example and studies the optimal configuration method of energy storage capacity. Considering the nonstationarity of the wind power, the task of stabilization using Empirical Mode Decomposition (EMD) is split. Then, complementary stabilization is used to realize the energy storage of mutual advantage complement and improve the smooth degree. At last, considering economics, smooth and battery life, the model of capacity determination of hybrid energy storage is built. In this model, cost efficiency is the objective function and rain flow counting method is used to calculate the loss of battery life. This model analyzes whether it can improve the economic efficiency and smooth capacity of the scheme or not if allowing to overcharge and over discharge appropriately. It is verified that under reasonable cooperation scheme composite different battery media can increase the stabilizing ability of unit investment compared to the single battery medium.

Key words: empirical mode decomposition (EMD); complementary to stabilize; cost efficiency method; rain flow counting; overcharge and over discharge

中图分类号： TM71 文章编号： 1674-3415(2015)24-0055-08

0 引言

随着风力在电网中发电渗透率的上升，风电的波动性给火电的出力和备用调度提出了更高的要求[1]。而大规模储能装置是风电出力预测误差平抑的主要手段之一，特别是近年来，随着电池储能、超级电容器储能、飞轮储能等储能装置技术的进步和成本的降低，使用储能装置成为了风电波动平抑措施研究的重点。

目前风电波动平抑时储能配置大多采用单种介质蓄电池[2-5]或复合多种类型储能装置[6-8]。后者通过合理分配风电波动平抑任务，可以发挥不同储能装置各自的优势，使其各司其职，从而在降低储能投资成本的同时提高平抑能力，故其成为了未来储能用于风电波动平抑的研究热点。

用于风电波动平抑的混合储能类型包括复合蓄电池和超级电容器[6-7]以及复合多种介质类型的蓄电池[8]。平抑任务分解方法有一阶滤波、滑动平均、

卡尔曼滤波和小波分解等[7-9]，而文献[10-12]实现了储能在可再生能源平抑时的选址定容和仿真调度，上述方法通过设置不同参数的滤波器实现平抑任务分解，而此时储能配置结果依赖于滤波器参数设置的合理性。

但决定风电出力的大气过程是非平稳的时间序列，非平稳性使选取不同时间断面得到的最优参数不同，故本文采用能够揭示序列振荡结构特性和非平稳性的经验模态分解进行平抑任务分解[13]。同时在储能装置功率和容量约束条件下，为提高风电平抑度，采用互补平抑的思想[8]，通过储能装置互补配合尽可能地提高其平抑能力。

本文旨在将风电波动平抑的储能装置配置进一步拓展为超级电容器和两种介质蓄电池的配合。目的是通过储能任务分配细化，进一步提高风电波动的平抑能力和经济性[14]。建立风电波动平抑的混合储能定容模型时，引用费用效率[14](*CE*)作为目标函数能够综合权衡平抑度和经济性两方面因素，相较传统配置方案[6-8]费用效率更能体现单位投资的平抑收益。而储能的寿命折损与其运行阶段的充放电次数及深度相关[15-16]，故统计年限内储能装置的寿命折损可利用雨流计数法[6,17-18]计算放电次数及放电深度，然后根据放电深度和全寿命循环次数之间的关系计算寿命折损。利用所建模型分析过充过放对储能配置方案的影响，并将文中模型与复合超级电容器和单种介质蓄电池对比，证明该模型设计的合理性和经济方面的优越性。

1 平抑任务目标分解和互补平抑

1.1 超级电容器和两种介质蓄电池的选择

为充分体现不同类型蓄电池各自的优势，蓄电池选择“功率型”的锂离子电池(VRLA)和“能量型”的钒液电池(VRB)。传统的方法多是用“功率型”电池和超级电容器(EC)配合平抑波动，但若进一步引入“能量型”电池分担“功率型”电池任务中周期较长的波动，则能够提高平抑效果和经济性。即将任务分解进一步细化，发挥 VRB 廉价的容量优势。两种介质蓄电池和超级电容器的参数[19-20]于表 1 中给出。

表 1 中的 *SOC* 表示剩余电量百分比。下文将 EC、VRLA、VRB 分别用第 1~3 种储能设备表示。

但是引入 VRB 后，混合储能的类型增加，需要更合理的任务分解和互补平抑方法来确保其容量和功率的有效利用，这点将在 1.2~1.3 节说明。

表 1 两种介质蓄电池和超级电容器参数

Table 1 Parameters of super capacitor and two kinds of battery media

储能类型	功率费用/($/kW)	容量费用/($/kWh)	辅助费用/($/kW)	充电效率/%	放电效率/%
EC	300	20 000	100	95	95
VRLA	1 800	900	100	90	90
VRB	3 000	750	100	75	75

储能类型	运维费用/($/kW)	SOC_{min}/%	SOC_{max}/%	自持放电率/(%/5 min)
EC	15	20	90	0.05
VRLA	10	25	95	0
VRB	30	25	100	0

1.2 平抑任务的目标分解

传统的时间序列分解方法大多按一定截断频率进行频谱分割，或者将序列根据展开系数在某种基底函数系上展开。进行频谱分割或基于某个基底函数系的展开存在唯一的截止频率或展开系数的前提条件是时间序列具有平稳性，但风电出力的主要影响因素是长期大气过程，而大气变化过程是非线性和非平稳的，因此传统的分解方法确定的截止频率和展开系数不具有合理性。经验模态分解(EMD) [13]能将序列中固有的、内在的本征模态函数分量逐级分离出来，得到序列的多尺度振荡特性，通过几个内在的本征模态和一个剩余序列反映大气过程的振荡结构特性和非平稳特性。据此，本文使用经验模态分解确定每种储能装置需要承担的任务。分解某日风电平抑目标得到的各种储能装置需承担的功率任务及对应的容量任务如图 1 所示。

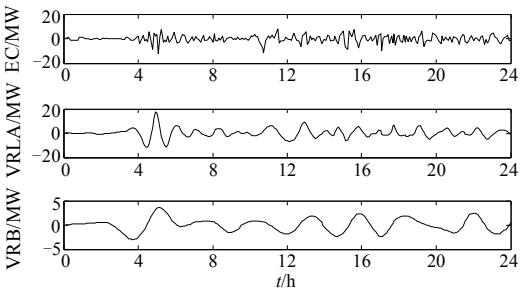

图 1 时间断面下平抑任务分解

Fig. 1 Task decomposition of stabilization under the time section

由图 1 可知，EMD 分解保证了功率成本较低的 EC 承担频繁波动的平抑任务，而功率成本较高的 VRB 承担趋势性波动的平抑任务，据此实现了平抑任务的合理分配，发挥了不同储能装置各自的优势。

但因存在容量和功率约束，以往当某时刻储能装置功率和容量不足以平抑波动，则舍弃无法完成的平抑任务。但实际上此时其他储能装置可能接纳部分或全部该储能装置无法完成的平抑任务。如何实现储能装置的互补配合尽可能地充分利用其功率和容量[21]，将在 1.3 节中说明。

1.3 平抑任务的互补平抑

构建的互补平抑方法满足以下原则：

(1) 如果某时刻储能装置因功率不足未完成平抑任务时，则将未完成的平抑任务转移到功率成本较低的储能装置中。但当 EC 因功率不足未能完成平抑任务时，因 EC 单位功率成本最低，直接舍弃其未能完成的平抑任务。

(2) 如果某时刻储能装置因容量不足未完成平抑任务时，则将未完成的平抑任务转移到容量成本较低的储能装置中。但当VRB 因容量不足未能完成平抑任务时，因VRB 单位容量成本最低，直接舍弃其未能完成的平抑任务。

(3) 若某时刻同时存在因功率和容量不足未完成平抑任务，则将因功率不足未完成任务按(1)处理，剩余平抑任务按(2)中方法处理。

综合以上三条，其互补平抑的平抑任务转移逻辑如表 2 所示，表 2 中箭头表示将未能完成的任务转移到箭头所指的方向。同时存在两个方向箭头时参考(3)中所述；$p_{i,t}$、$E_{i,t}$ 代表第 i 种储能 t 时刻平抑任务的功率和容量，$p_{i\min}$、$p_{i\max}$、$E_{i\min}$、$E_{i\max}$ 分别代表第 i 种储能装置的功率和容量的最大最小约束值，Δt 为电池运行最小时间段。

表 2 储能装置互补转移平抑任务过程

Table 2 Process of fulfilling the task of stabilization using complementary energy storage

充放状态	充电			
储能状态	$p_{i,t}\le p_{i\max}$ $E_{i,t}\le E_{i\max}$ 情况 1	$p_{i,t}> p_{i\max}$ $E_{i,t}\le E_{i\max}$ 情况 2	$p_{i,t}\le p_{i\max}$ $E_{i,t}> E_{i\max}$ 情况 3	$p_{i,t}> p_{i\max}$ $E_{i,t}> E_{i\max}$ 情况 4
EC	—	风电舍弃	↓	风电舍弃↓
VRLA	—	↑	↓	↑↓
VRB	—	↑	风电舍弃	↑风电舍弃
充放状态	放电			
储能状态	$p_{i,t}> p_{i\min}$ $E_{i,t}> E_{i\min}$ 情况 5	$p_{i,t}\le p_{i\min}$ $E_{i,t}> E_{i\min}$ 情况 6	$p_{i,t}> p_{i\min}$ $E_{i,t}\le E_{i\min}$ 情况 7	$p_{i,t}\le p_{i\min}$ $E_{i,t}\le E_{i\min}$ 情况 8
EC	—	平抑不足	↓	平抑不足↓
VRLA	—	↑	↓	↑↓
VRB	—	↑	平抑不足	↑平抑不足

表 2 中总结了(1)~(3)中三种储能装置对应 8 种情况下的互补平抑方案，但是上述仅给出了(1)~(3)中未能完成的平抑任务处理办法，下面将在表 3 中总结(1)~(3)中互补平抑后第 i 种储能 t 时刻的功率和容量 $p'_{i,t}$、$E'_{i,t}$ 的计算方法[2]。

表 3 互补平抑时储能装置对应功率和容量

Table 3 Power and capacity of energy storage device when using complementary stabilization

充放状态	充电过程 $E_{i,t}\le E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+p_{i,t}\times\Delta t\times\eta_{\mathrm{cha},i}$	
状态位	情况 1	情况 2
功率及容量	$p'_{i,t}=p_{i,t}$ $E'_{i,t}=E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+$ $p_{i,t}\times\Delta t\times\eta_{\mathrm{cha},i}$	$p'_{i,t}=p_{i\max}$ $E'_{i,t}=E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+$ $p_{i\max}\times\Delta t\times\eta_{\mathrm{cha},i}$
平抑不足	无	功率不足：$\Delta p^{p}_{i,t}=p_{i,t}-p_{i\max}$
状态位	情况 3	情况 4
功率及容量	$p'_{i,t}=(E_{i\max}-E'_{i,t-1}(1-\delta_i))/$ $(\Delta t\times\eta_{\mathrm{cha},i})$ $E'_{i,t}=E_{i\max}$	$p'_{i,t}=\min((E_{i\max}-E'_{i,t-1}(1-\delta_i))/$ $(\Delta t\times\eta_{\mathrm{cha},i}),p_{i\max})$ $E'_{i,t}=\min(E_{i\max},E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+$ $p_{i\max}\times\Delta t\times\eta_{\mathrm{cha},i})$
平抑不足	容量不足： $\Delta p^{E}_{i,t}=p_{i,t}-p'_{i,t}$	功率不足：$\Delta p^{p}_{i,t}=p_{i,t}-p_{i\max}$ 容量不足：$\Delta p^{E}_{i,t}=p_{i\max}-p'_{i,t}$
充放状态	放电过程 $E_{i,t}=E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+p_{i,t}\times\Delta t/\eta_{\mathrm{dis},i}$	
状态位	情况 5	情况 6
功率及容量	$p'_{i,t}=p_{i,t}$ $E'_{i,t}=E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+$ $p_{i,t}/\eta_{\mathrm{dis},i}\times\Delta t$	$p'_{i,t}=p_{i\min}$ $E'_{i,t}=E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+$ $p_{i\min}/\eta_{\mathrm{dis},i}\times\Delta t$
平抑不足	无	功率不足：$\Delta p^{p}_{i,t}=p_{i,t}-p_{i\min}$
状态位	情况 7	情况 8
功率及容量	$p'_{i,t}=(E_{i\min}-E'_{i,t-1}(1-\delta_i))\times$ $\eta_{\mathrm{dis},i}/\Delta t$ $E'_{i,t}=E_{i\min}$	$p'_{i,t}=\min((E_{i\min}-E'_{i,t-1}(1-\delta_i))\times$ $\eta_{\mathrm{dis},i}/\Delta t,p_{i\min})$ $E'_{i,t}=\min(E_{i\min},E'_{i,t-1}(1-\delta_i)+$ $p_{i\min}/\eta_{\mathrm{dis},i}\times\Delta t)$
平抑不足	容量不足： $\Delta p^{E}_{i,t}=p_{i,t}-p'_{i,t}$	功率不足：$\Delta p^{p}_{i,t}=p_{i,t}-p_{i\min}$ 容量不足：$\Delta p^{E}_{i,t}=p_{i\min}-p'_{i,t}$

表 3 中 $\eta_{\mathrm{cha},i}$、$\eta_{\mathrm{dis},i}$ 分别代表第 i 种储能的充放电效率，δ_i 代表第 i 种储能的自持放电率，利用互补平抑过程能进一步充分利用储能装置的功率和容量，提高复合储能方法的平抑能力。

2 容量配置的目标函数和约束条件

2.1 容量配置目标函数

为综合考虑风电波动的平抑度和储能工程投入成本，利用费用效率法求得费用效率(*CE*)作为目

标函数。费用效率(*CE*)是指工程系统效率(*SE*)与工程全寿命周期成本[14,22] (*LCC*)的比值，即单位费用的平抑能力，因此其取值越大越好。

把储能工程投入后平抑任务的完成率即平抑度η_{sta}作为其工程系统效率(*SE*)，并将工程全寿命周期成本(*LCC*)按该年寿命折损、弃风量和平抑不足折算成储能装置年均投资成本(*AC*)。工程寿命周期成本(*LCC*)包括经济成本和环境成本，经济成本指设置费(*IC*)和维持费(*SC*)两部分。对应第i种储能装置的设置费(*IC*)包括储能装置初始建设成本$C_{\text{initial},i}$和辅助设备成本$C_{\text{aid},i}$，而维持费(*SC*)指储能装置运行维护成本$C_{\text{sc},i}$。利用雨流计数法计算该年各类储能的寿命折损分别为$K_{\text{life},i}$，寿命折损的计算方法在2.2节中说明。而环境成本(*PM*)指储能工程在其全寿命周期内对环境潜在和显在的不利影响，包括风电舍弃损失C_{abondon}和平抑不足惩罚成本C_{lack}，计算公式如式(1)~式(5)所示[14]。

$$\max \quad CE=\frac{SE}{LCC}=\frac{\eta_{\text{sta}}}{AC}=\frac{\eta_{\text{sta}}}{IC+SC+PM} \tag{1}$$

$$\eta_{\text{sta}}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\int_{t=(i-1)\Delta t}^{i\Delta t}\left|p_{\text{w}}(t)-p_{\text{r}}(t)\right|\text{d}t}{\sum_{i=1}^{n}\int_{t=(i-1)\Delta t}^{i\Delta t}\left|p_{\text{w}}(t)-p(t)\right|\text{d}t}\right)\times 100\% \tag{2}$$

$$IC=\sum_{i=1}^{3}K_{\text{life},i}(C_{\text{initial},i}+C_{\text{aid},i})=\sum_{i=1}^{3}K_{\text{life},i}(n_{\text{inp},i}p_i+n_{\text{vnp},i}E_i+n_{\text{aidp},i}p_i) \tag{3}$$

$$SC=\sum_{i=1}^{3}C_{\text{sc},i}=\sum_{i=1}^{3}n_{\text{sc},i}p_i \tag{4}$$

$$PM=C_{\text{abondon}}+C_{\text{lack}}=\sum_{j=1}^{n}\int_{t=(j-1)\Delta t}^{j\Delta t}(\alpha\times\text{Posit}(p_{\text{w}}(t))\times(p_{\text{w}}(t)-p_{\text{r}}(t))+\beta\times\text{Posit}(-p_{\text{w}}(t))\times(p_{\text{r}}(t)-p_{\text{w}}(t)))\text{d}t \tag{5}$$

式(2)中：$p_{\text{w}}(t)$为风电出力的平抑目标；$p(t)$为储能加入前风电功率；$p_{\text{r}}(t)$为储能平抑后功率。$n_{\text{inp},i}$、$n_{\text{vnp},i}$、$n_{\text{aidp},i}$、$n_{\text{sc},i}$对应第i种储能的单位功率成本系数、容量成本系数、辅助设备成本系数和运维费用系数；p_i、E_i对应第i种储能配置的功率和容量值；α、β分别代表风电舍弃惩罚因子和平抑不足惩罚因子；Posit(•)为取正函数，其含义为针对$y=\text{Posit}(x)$，当$x\geq 0$时，$y=x$；当$x<0$时，$y=0$。

2.2 雨流计数法计算储能装置寿命折损

超级电容器全寿命的循环次数为50~100万次，而其运行年限一般为30年左右。即风电波动平抑时，EC的循环次数足够使用，故认为其寿命仅受年限的影响。而影响蓄电池寿命的因素包括过充过放、倍率性能和放电深度等，本文主要讨论放电深度和过充过放对蓄电池寿命的影响。

放电深度*DOD*对蓄电池寿命的影响可通过雨流计数法统计，雨流计数法又称“塔顶法”，在疲劳寿命计算中应用非常广泛，雨流计数法能够统计蓄电池放电深度和充放次数。进而根据放电深度和充放次数计算蓄电池的寿命折损[6,17-18]。

用雨流计数法分析VRB某天的容量波动，对应充放次数及放电深度如图2。

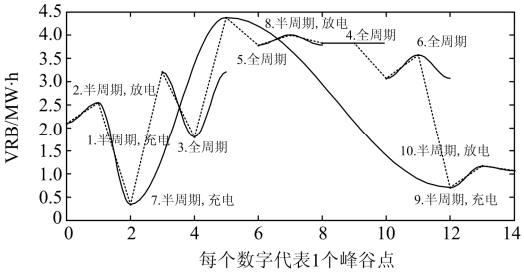

图2 雨流计数法示意图

Fig. 2 Sketch of rain flow counting method

图2首先统计VRB该日容量波动的峰谷点，然后利用峰谷点求VRB充放周期及对应放电深度。由表4中对应蓄电池放电深度DOD_i和循环次数N_i的关系得到其寿命折损。表4为拟合得到的放电深度和循环次数两者间的关系[6, 23-24]。

表4 蓄电池循环次数和放电深度关系表

Table 4 Correlation chart between battery cycle number and depth of discharge

拟合函数	$N_i=a_1+a_2\text{e}^{-a_3DOD_i}+a_4\text{e}^{-a_5DOD_i}$				
函数系数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
VRLA(N_2)	3 600	10 650	3.983	1 430	1.69
VRB(N_3)	9 000	26 620	3.983	3 575	1.69

表4中*DOD*的变化范围为0~100%，即能够统计过充过放时蓄电池的寿命损失。等效寿命折损计算时，认为全周期充放电的寿命折损为循环次数的倒数，而充电或放电半周期的寿命折损为循环次数倒数的一半，即由式(6)可求得$K_{\text{life},i}$。

$$K_{\text{life},i}=\sum_{j=1}^{n_{1,j}}\frac{1}{N(i,j)_{\text{cycle}}}+0.5\times\sum_{j=1}^{n_{2,j}}\frac{1}{N(i,j)_{\text{half-cycle}}} \tag{6}$$

式(6)中，$n_{1,i}$、$n_{2,i}$ 分别为第 i 种储能装置在一年内的全周期和半周期充放次数。对应第 j 次全周期或半周期充放电的全寿命周期循环次数分别为 $N(i,j)_{\text{cycle}}$、$N(i,j)_{\text{half-cycle}}$。

2.3 容量配置的约束条件

约束条件分为单种储能装置的 *SOC* 和功率约束以及多种储能装置功率和容量的配置关系约束。其配置关系满足功率成本越高的储能装置的功率配置越小，且容量成本越高的储能装置容量值越小。既保证储能装置优势的发挥，同时尽可能避免其劣势。EC、VRLA 和 VRB 分别用下角标 1~3 代表，则其约束条件如下：

$$p_{i\min} \le p_{i,t} \le p_{i\max} \quad i=1,2,3 \tag{7}$$

$$SOC_{i\min} \le SOC_{i,t} \le SOC_{i\max} \quad i=1,2,3 \tag{8}$$

$$p_1 \ge p_2 \ge p_3 \tag{9}$$

$$E_1 \le E_2 \le E_3 \tag{10}$$

式(8)中 *SOC* 约束成立的前提条件是不允许过充过放，而如果允许过充过放则将式(8)用式(11)代替如下：

$$0 \le SOC_{i,t} \le 100\% \quad i=1,2,3 \tag{11}$$

过充过放对储能装置的寿命有较大影响，而过充过放时放电深度和寿命折损的关系亦可参考 2.2 节中所述。

3 算例模型的建立及结果分析

3.1 算例模型建立

储能装置参数见表 1，舍弃风电和平抑不足惩罚因子 α、β 取 0.2。风电功率数据选取某装机容量为 90 MW 风电场一年的风电出力。其中平抑目标 p_{w} 为平抑时间窗口为 1 h 的风电平抑后出力，而 p 为该年风电场 5 min 一个采样点的实际风电出力。则储能装置的平抑任务 $p_{\text{cancha}}=p_{\text{w}}-p$。然后以 24 h 为时间间隔，将一年数据截断为 n 个时间断面。平抑任务 p_{cancha} 数据如图 3 所示，共 105 120 个采样点。

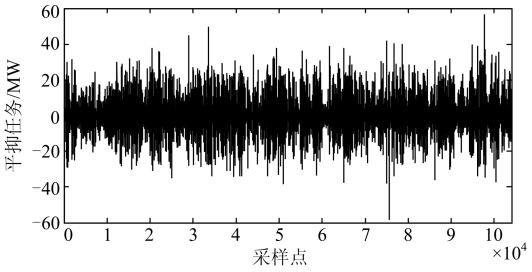

图 3 对应年限的平抑任务功率

Fig. 3 Power of stabilization task this year

针对本文建立的目标函数和约束条件，采用粒子群算法(PSO)进行求解。粒子群算法是源于对鸟群捕食行为进行研究，通过模拟鸟群捕食时的活动过程提出的一种智能算法。具有实现容易、精度高、收敛快等优点。针对本文研究的风电平抑的储能配置问题，粒子群算法的求解过程如下：

1) 初始化 PSO 算法粒子，生成 VRB、VRLA 和 EC 的功率 p_i 和容量 E_i；

2) 导入风电场整年日前预测风电功率 p_{w} 和实际出力 p，生成平抑任务 p_{cancha} 并将其按 24 h 为时间间隔，截取成 n 个时间断面；

3) 对每个 PSO 粒子导入其参数后，将平抑任务 P_{cancha} 按 1.2~1.3 节中任务分解和互补平抑的方法分解出各储能装置需承担的任务，然后根据式(1)~式(5)计算其费用效率 *CE*，并将 *CE* 值作为其适应度(fitness)值；

4) 根据粒子的 fitness 值按 PSO 算法规则进行粒子迭代，然后重复第 3 步，直到迭代精度满足 PSO 算法要求后停止迭代，输出最优粒子对应的储能装置参数。

3.2 过充过放对容量配置的影响分析

根据上文所述方法计算结果如表 5 所示，表中包括过充过放与否两种情况下，3.2~3.3 节中假设平抑度不小于 0.9，储能装置最优的容量配置及由式(1)~式(5)计算的衡量指标。

表 5 过充过放与否时储能装置参数及衡量指标

Table 5 Parameters and measurement index of energy storage device when allowed to overcharge and over discharge or not

储能装置参数	EC		VRLA		VRB	
p_i/MW E_i/MW•h	p_1	E_1	p_2	E_2	p_3	E_3
不计过充过放	24.17	6.42	3.79	7.80	2.07	22.08
允许过充过放	23.24	4.57	3.75	5.42	2.08	16.07

衡量指标	η_{sta}/%	年均投资成本 AC ($\times 10^6$ \$)		*CE*/%
		$IC+SC$	PM	
不计过充过放	90.03	18.9	0.73	4.58
允许过充过放	90.10	15.9	0.73	5.43

由表 5 对比过充过放与否两种情况下的储能容量配置及衡量指标，发现允许过充过放时年均储能投资成本 *AC* 减少了 $\$3\times10^6$，而对风电的平抑能力 η_{sta} 几乎不变。但允许过充过放能将费用效率(*CE*)从 4.58%提高到 5.43%，即过充过放能够提高单位储能投资的平抑能力，在不允许过充过放的储能容

量配置中，EC 的功率配置为 24.17 MW，大于 VRLA 的 3.79 MW 和 VRB 的 2.07 MW，说明利用了 EC 廉价的功率成本。而VRB的容量配置为 22.08 MWh，大于 EC 和 VRLA 的容量配置，这意味着 VRB 的容量优势也得到了充分利用。下面以不允许过充过放时某时间断面数据说明储能配置对风电波动的平抑能力，储能装置对平抑任务的完成度如图 4 所示。

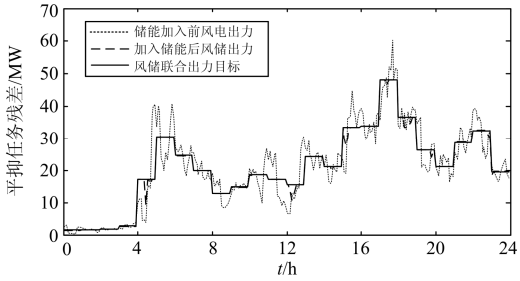

图 4 时间断面下储能装置的平抑效果

Fig. 4 Stabilization effect of energy storage device under the time section

在图 4 中，平抑任务较大的时段如 4~8 h，储能装置能完成大部分的平抑任务。但是在平抑任务较少的时段如 20~24 h，储能任务仍有微小波动无法平抑。这是由于 EMD 算法在任务分解时存在欠包络和过包络的问题，因此必然存在细小的平抑不足。针对图 4 中平抑任务，各储能装置承担的平抑任务和剩余电量(*SOC*)变化分别如图 5 和图 6 所示。

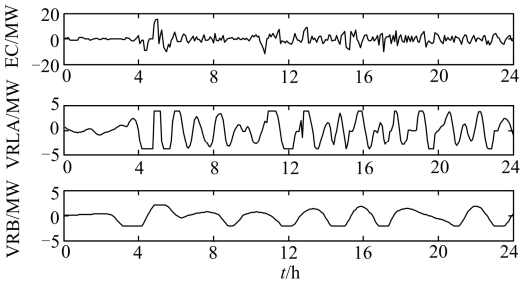

图 5 时间断面下储能装置的平抑出力

Fig. 5 Power of energy storage device under the time section

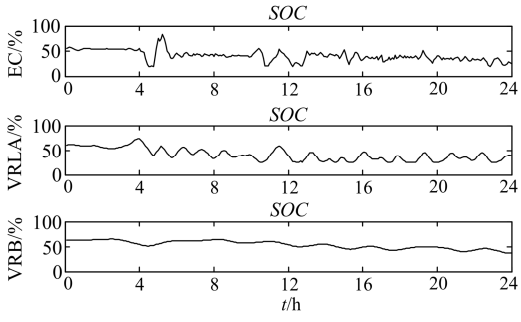

图 6 时间断面下储能装置的荷电状态

Fig. 6 State of charge of energy storage device under the time section

观察图 5，发现 VRB 因功率不足无法完成的平抑任务可通过互补平抑过程，由 VRLA 和 EC 承担部分平抑任务。

而由图 6 可知，EC 因容量不足无法完成的平抑任务可通过互补平抑由 VRLA 和 VRB 部分承担。以上分析验证了互补平抑方案满足 1.3 节中的原则(1)~(3)。

3.3 不同容量配置方案对比

目前研究的风电波动平抑多采用复合超级电容器和“功率型”电池的储能配置，其定容过程可参照文中目标分解模型建立复合 EC 和 VRLA 的混合储能定容模型，并将配置结果和衡量指标与前文中的混合储能模型对比，结果如表 6 所示。

表 6 不同储能配置方案的参数及衡量指标

Table 6 Parameters and measurement index of different schemes of energy storage configuration

储能装置参数	EC		VRLA		VRB	
p_i/MW E_i/MW·h	p_1	E_1	p_2	E_2	p_3	E_3
复合 EC 和 VRLA、VRB	24.17	6.42	3.79	7.80	2.07	22.08
复合 EC 和 VRLA	23.07	6.39	8.68	19.06	0	0

衡量指标	η_{sta}/%	年均投资成本 AC ($\times 10^6$ \$)		CE/%
		$IC+SC$	PM	
复合 EC 和 VRLA、VRB	90.03	18.9	0.73	4.58
复合 EC 和 VRLA	90.21	24.4	0.72	3.59

由表 6 可知，复合 EC 和 VRLA 的储能模型相较复合 EC、VRLA 和 VRB 的储能方案年均投资成本 AC 增加\$5.5×10^6，但是平抑能力 η_{sta} 差异不大。而复合 EC 和 VRLA、VRB 储能方案的费用效率 CE 为 4.58%，高于复合 EC 和 VRLA 的费用效率 3.59%。产生原因有：(1) 平抑任务分解的细化，使不同储能装置各司其职，发挥了各自功率或容量方面的成本优势；(2) 由表 4 可知，VRB 相较 VRLA 在运行寿命中具有更多循环次数，因此“能量型”蓄电池 VRB 的引入可以减小 VRLA 的寿命折损，降低 VRLA 的投资成本。

4 结论

本文为提高风电波动平抑能力和经济性，建立了复合超级电容器和不同介质蓄电池的混合储能定容优化模型，并进一步深入研究了：

1) 对比了储能装置过充过放与否时，混合储能

模型的年均投资成本 AC，平抑能力 η_{sta} 和费用效率 CE，发现适当允许过充过放可以提高单位投资的平抑收益，但是过充过放会带来安全性问题，因此并不提倡储能采用过充过放的模式运行；

2) 对比了复合超级电容器和两种介质蓄电池与复合单种介质蓄电池和超级电容器容量配置方案的衡量指标，发现前者能够提高费用效率 CE，使单位成本的投资平抑能力更高。

参考文献

[1] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.

[2] 徐群, 吕晓禄, 武乃虎, 等. 考虑电池寿命和过放现象的风电场储能容量优化[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1505-1511.
XU Qun, LÜ Xiaolu, WU Naihu, et al. Optimization of energy storage capacity for wind farm considering battery life and over-discharge[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1505-1511.

[3] 杨水丽, 李建林, 惠东, 等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1485-1491.
YANG Shuili, LI Jianlin, HUI Dong, et al. Optimal capacity configuration of battery energy storage system to track planned output of wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1485-1491.

[4] 冯江霞, 梁军, 冯益坤. 基于风电功率min级分量波动特性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 1-6.
FENG Jiangxia, LIANG Jun, FENG Yikun. Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 1-6.

[5] 李滨, 陈姝, 梁水莹. 一种平抑光伏系统输出波动的储能容量优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 45-50.
LI Bin, CHEN Shu, LIANG Shuiying. A capacity optimization of energy storage system for output smoothing of photovoltaic station[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 45-50.

[6] 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, 33(34): 91-97, 16.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97, 16.

[7] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108-114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 108-114.

[8] 张峰, 董晓明, 梁军, 等. 考虑目标分解及其互补平抑的风电场复合储能容量优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 9-15.
ZHANG Feng, DONG Xiaoming, LIANG Jun, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system based on target decomposition and complementary fluctuations smoothing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 9-15.

[9] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126-135.
WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 126-135.

[10] 刘小寨, 徐天, 葛立坤, 等. 含风电场的电网储能系统选址和优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 119-125.
LIU Xiaozhai, XU Tian, GE Likun, et al. Location selection and optimal allocation for energy storage system of power system with wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 119-125.

[11] 黄先进, 郝瑞祥, 张立伟, 等. 超级电容压缩空气混合储能应用于光伏发电系统的EMR建模与控制[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 53-61, 67.
HUANG Xianjin, HAO Ruixiang, ZHANG Liwei, et al. EMR modeling and control for a hybrid energy storage based on super-capacitor and compressed air used in PV system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 53-61, 67.

[12] 郭芳, 邓长虹, 廖毅, 等. 功率平滑用电池储能系统的功率响应特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 434-440.
GUO Fang, DENG Changhong, LIAO Yi, et al. Research on the response characteristics of BESS used in power smoothing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 434-440.

[13] 郑光祖, 刘莉红. 经验模态分解与小波分解及其应用

[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 1-2, 217-219.

[14] 项勇. 工程经济学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 211-218.

[15] 娄素华, 易林, 吴耀武, 等. 基于可变寿命模型的电池储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 265-271.
LOU Suhua, YI Lin, WU Yaowu, et al. Optimizing deployment of battery energy storage based on lifetime predication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 265-271.

[16] 易林, 娄素华, 吴耀武, 等. 基于变寿命模型的改善风电可调度性的电池储能容量优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 53-59.
YI Lin, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Optimal battery capacity based on lifetime predication for improving the schedulability of the wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 53-59.

[17] KARMIRIS G, TENGNER T. Control method evaluation for battery energy storage system utilized in renewable smoothing[J]. Industrial Electronics Society, 2013, 10(13): 1566-1570.

[18] TANKARI M A, CAMARA M B, DAKYO B, et al. Use of ultra capacitors and batteries for efficient energy management in wind-diesel hybrid system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 414-424.

[19] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.
JIANG Kai, LI Haomiao, LI Wei, et al. On several battery technologies for power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 47-53.

[20] 丁明, 徐宁舟, 毕锐, 等. 基于综合建模的3类电池储能电站性能对比分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 34-39.
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui, et al. Modeling and comparative study on multiple battery energy storage systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 34-39.

[21] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于寿命量化的混合储能系统协调控制参数优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 1-5.
LI Fengbing, XIE Kaigui, ZHANG Xuesong, et al. Optimization of coordinated control parameters for hybrid energy storage system based on life quantization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 1-5.

[22] 程世军, 张粒子. 风力发电系统中储能容量的优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 71-75.
CHENG Shijun, ZHANG Lizi. Energy storage capacity optimization for wind power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 71-75.

[23] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 260-267.
HU Guozhen, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Sizing and cost analysis of photovoltaic generation system based on vanadium redox battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 260-267.

[24] 高飞, 杨凯, 惠东, 等. 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 41-45, 8.
GAO Fei, YANG Kai, HUI Dong, et al. Cycle-life energy analysis of LiFePO4 batteries for energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 41-45, 8.

收稿日期：2015-03-10； 修回日期：2015-06-29

作者简介：

栗 然(1965-)，女，博士，教授，研究方向为新能源与并网技术、电力系统分析、运行与控制；E-mail: liranlelele@163.com

党 磊(1991-)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为电力系统分析、运行与控制；E-mail: danglei_mao@126.com

周鸿鹊(1991-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统分析、运行与控制。

（编辑 魏小丽）