



基于电池特性的风电场综合储能优化配置

韩晨阳 张鹏 徐金华

Optimal Configuration of Integrated Energy Storage for Wind Farms Based on Battery Characteristics

HAN Chenyang, ZHANG Peng, XU Jinhua

引用本文:

韩晨阳, 张鹏, 徐金华. 基于电池特性的风电场综合储能优化配置[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 92–99. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0230

HAN Chenyang, ZHANG Peng, XU Jinhua. Optimal Configuration of Integrated Energy Storage for Wind Farms Based on Battery Characteristics[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(1): 92–99. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0230

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0230>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于信息间隙决策理论的综合负荷聚合商储能优化配置模型

Optimal Configuration of Energy Storage for Integrated Load Aggregator Based on Information Gap Decision Theory
现代电力. 2021, 38(2): 193–204 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0305>

新能源场站储能系统的鲁棒优化配置策略

Robust Optimization Configuration Strategy for Energy Storage System of New Energy Station
现代电力. 2021, 38(6): 636–644 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0026>

考虑能源枢纽变工况特性的综合能源系统优化配置

Optimal Configuration of Integrated Energy System Considering Variable Condition Characteristics of Energy Hub
现代电力. 2022, 39(5): 547–553 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0175>

含惯量控制的高渗透率风电接入交直流混联输电系统的稳定性分析

Stability Analysis of High Permeability Wind Power with Inertial Control Connected to AC–DC Hybrid Transmission System
现代电力. 2022, 39(4): 406–413 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0155>

考虑蓄电池SOC安全范围的混合储能平抑风光功率波动策略

Strategy of Hybrid Energy Storage to Stabilize Wind–PV Power Fluctuation Considering Battery SOC Safety Range
现代电力. 2018, 35(3): 84–89 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I3/84>

计及蓄电池寿命的风光储微网系统能量优化管理

Optimal Energy Management of Wind–photovoltaic–storage Microgrid System Considering Battery Life
现代电力. 2018, 35(3): 62–69 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I3/62>

基于电池特性的风电场综合储能优化配置

韩晨阳, 张鹏, 徐金华

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206)

Optimal Configuration of Integrated Energy Storage for Wind Farms Based on Battery Characteristics

HAN Chenyang, ZHANG Peng, XU Jinhua

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 为应对高风电渗透率, 对其所在区域的电网稳定性提出了更高要求。储能作为应对高风电渗透率的关键因素, 其配置与系统最终稳定性密切相关。为解决单纯依靠增加单一储能配置来提升电网稳定性将会造成投资成本高等问题, 兼顾储能的可靠性与经济性, 基于不同类型电池特性提出了一套储能配置方案: 将锂电池功率调节性强与液流电池容量储存度大的优势相结合, 依据通过实际需求所设立的技术指标, 结合储能平均使用成本最小化的目标函数, 利用免疫算法进行求解, 得到所提储能功率与容量的综合配置方案。最后利用山东某风场数据进行实例分析, 评估所提方案下的储能配置对于风场出力的改善情况, 验证此方案的经济性与可靠性。

关键词: 高风电渗透率; 电网稳定性; 电池特性; 储能配置

Abstract: To cope with high wind power penetration, a higher requirement for the stability of the regional power grid, where the wind farm locates, is put forward. As the key factor to cope with high wind power penetration, the configuration of energy storage is closely related to the final stability of power grid. To solve the problem that it would cause high investment cost because of improving power grid stability by relying on single type of energy storage equipments and it was necessary to consider both the economy and reliability of energy storage, based on the characteristics of different sorts of batteries a configuration scheme of energy storage equipments, which combined the strong power regulation performance of the lithium battery with the high energy storage capacity of the liquid flow battery, was proposed. Based on the technical indices established according to the actual demand and combining with the objective function, in which the average usage cost was minimized, the proposed configuration scheme was solved by immune algorithm, thus a comprehensive configuration scheme of

energy storage power and capacity were obtained. Finally, a case-study based on the data of a certain wind farm located in Shandong province was conducted to evaluate the improvement of wind farm output under the proposed energy storage equipment configuration in the proposed scheme to verify the economy and the reliability of the proposed scheme.

Keywords: high wind power penetration rate; grid stability; battery characteristics; energy storage configuration

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0230

0 引言

随着世界能源系统向新型清洁能源发展, 风电等清洁能源将会逐步取代传统化石能源在电网中的地位^[1]。然而此类能源随机性与波动性较大, 将会给电网调度运行带来巨大挑战^[2]。提升电网对于风电等新型能源的消纳率是保证电网持续稳定运行的关键。储能作为一种新兴技术, 其规模化应用将提供给电网一种新型提高新能源消纳率的方法。因此, 合理地进行储能配置是后续储能规模化应用的关键所在。

国内外对此展开了大量研究, 其方向主要聚焦于经济性与可靠性 2 个方面。对于经济性方面, 文献 [3] 引入了信息间隙决策理论来进行储能配置, 将综合负荷聚合商最小化为经济目标, 得出了相应的储能配置方案; 文献 [4] 从电网运行策略及其他子网辅助协作影响的角度出发, 综合考虑了储能选址及定容问题, 得出了储能配置的最优经济方案; 文献 [5] 将环境当成成本因素加入成本函数中综合考虑, 得出储能优化配置; 文献 [6] 综合考虑了风能、储能系统的调节特性, 用储能

能量最小化风能的预测误差，从而使系统成本最小化。

对于可靠性方面，文献 [7] 考虑储能系统的技术特性以及供电概率损失 (loss of supply probability, LSP)，避免权重因子影响而得到储能配置最优解；文献 [8] 引入负荷概率性，利用卷差法处理得出所需要的储能配置；文献 [9] 考虑风光能量吸收率，选用抽水蓄能为储能装置，得出最佳储能配置。

考虑到储能配置的经济性和可靠性的相互制约关系，有学者提出了综合上述 2 方面因素以符合新型电网需求的储能配置方法。文献 [10] 提出了一种以收益最大化为目标，以电池储能为主体，兼顾电网安全约束的储能配置方法；文献 [11] 建立了以系统弃风弃光率、功率缺额率和经济性为多目标容量优化配置模型，求解出储能配置方案。

然而上述研究很少关注储能设备本身的特性，配置方案仅仅采用单一型储能设备，不能完全满足需求特性。文献 [12-13] 考虑了不同储能设备自身的特性，利用傅里叶函数将负荷进行频域划分后根据对应频段选择储能手段。但这类方法往往需要根据实际情况选择恰当的截止频率，截止频率的选择成为了配置方案能否成功应用的关键，如果选择不当，储能将不能达到预期效果，甚至会带来更多的不确定因素。

针对以上问题，本文基于具体储能电池不同类型的特性区别，计及功率型锂电池与容量型液流电池各自在功率容量调节性上的优势，提出相应的储能配置策略。首先，建立电池型储能系统模型 (锂电池与液流电池模型一致，内在参数不同)，在此基础上提出双层储能配置优化模型，上层模型以保证风电场站的可靠性为目标，下层模型以储能平均使用成本最低为目标，综合得出储能的最优配置方案，该方法既避免对截止频率的选择，又保证系统的可靠性要求。最后用实际风电场数据，验证方案的真实效果。

1 电池型储能系统模型

电池储能系统与风电场联合系统模型如图 1。

图 1 中： $P_B(t)$ 为电池储能系统的充放电功率； $P_{wind}(t)$ 为风电场的输出功率； $P_{ref}(t)$ 为风储联合系统的期望输出功率。由图 1 可得它们之间的关系为：

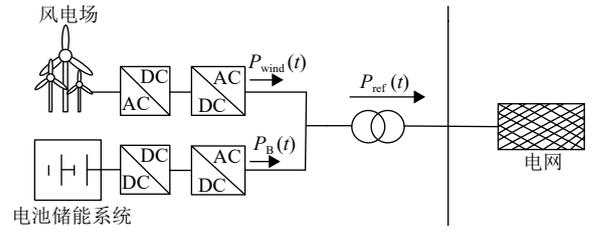


图 1 风电场与电池储能联合系统

Fig. 1 Combined system of wind farm with battery energy storage

$$P_{ref}(t) = P_B(t) + P_{wind}(t) \quad (1)$$

当电池储能系统充电时，其荷电状态 (state of charge, SOC) S 为^[14]：

$$S(t) = (1 - \alpha)S(t - \Delta t) - \frac{P_B(t) \cdot \Delta t \cdot \eta}{E_B} \quad (2)$$

此时， $P_B(t)$ 的取值如下：

$$P_B(t) = \begin{cases} P_{ref}(t) - P_{wind}(t), & |P_{ref}(t) - P_{wind}(t)| \leq P_{max} \\ -P_{max}, & |P_{ref}(t) - P_{wind}(t)| > P_{max} \end{cases} \quad (3)$$

当电池储能系统放电时，其荷电状态为：

$$S(t) = (1 - \alpha)S(t - \Delta t) - \frac{P_B(t) \cdot \Delta t}{\eta E_B} \quad (4)$$

$$P_B(t) = \begin{cases} P_{ref}(t) - P_{wind}(t), & |P_{ref}(t) - P_{wind}(t)| \leq P_{max} \\ P_{max}, & |P_{ref}(t) - P_{wind}(t)| > P_{max} \end{cases} \quad (5)$$

当电池储能系统不动作时，其荷电状态为：

$$S(t) = (1 - \alpha)S(t - \Delta t) \quad (6)$$

式中： α 为电池自放电率； η 为电池的充放电效率； E_B 为电池的额定容量； Δt 为所取的时间间隔； P_{max} 为电池功率的最大充放电功率限制； S 的取值范围为 [0,1]。锂电池与液流电池模型相同，只是内在参数不同，故不再重复建模。

2 储能配置优化模型

2.1 储能的功率与容量配置模型

2.1.1 功率平抑有效性

将风电场数据进行处理，以风功率的短时平均输出作为功率补偿后的期望输出^[14] (一般取风电场 1 年的数据)，短时期望的时间间隔 T 取 1800 s 即 30 min，功率的取样点为 1 s， M 为取样点个数，则该时段的功率期望 $P_{ref-p}(t)$ 输出为：

$$T = M \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$P_{ref-p}(t) = \frac{1}{M} \sum_{t=t_1}^{t_2} P_{wind}(t), t \in [t_1, t_2] \quad (8)$$

根据所得功率期望出力数据,计算电池储能系统的补偿功率。然而对真实风电场进行完全补偿使其与期望出力输出一致,在多数时候会造成电池处于闲置状态,造成资源浪费。故设置功率平抑有效性来衡量功率补偿的效果,只要该指标满足一定数值,就可以认定功率补偿满足要求。

功率平抑有效性 η_{p-e} 为:

$$\eta_{p-e} = \frac{\sum_{P(t)=P_{ref-p}(t)} t}{\sum_{all} t} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $\sum_{P(t)=P_{ref-p}(t)} t$ 表示加入储能功率补偿后,实际输出满足期望输出时的时间总和; $\sum_{all} t$ 表示整个平抑时间周期内的总时间。

2.1.2 储能容量平抑功率上下界

完成功率平抑后,此时系统出力与预期计算值基本一致,然而上述计算过程有局限性,功率在一天内仍然有较大波动,这时应制定该功率浮动的上下限,高于上限进行削峰,小于下限时进行填谷,使出力功率更加平稳,进一步改善系统出力。

此指标属于前置条件,对于后续工作非常关键。本文将功率的上下限分别用 L_{high} 、 L_{low} 来表示。

2.1.3 削峰填谷能量

完成功率上下界限制定后,为了确定一天内(按照此界限下),电池储能系统可能吸收或释放的最大能量,对满足条件的时刻进行积分得到具体数值。

$$E_{pe} = \sum_1^{k_1} \int_{P_{ref-p}(t_1) \geq L_{high}}^{P_{ref-p}(t_2) \geq L_{high}} (P_{ref-p}(t) - L_{high}) dt \quad (10)$$

$$E_{va} = \sum_1^{k_2} \int_{P_{ref-p}(t_1) \leq L_{low}}^{P_{ref-p}(t_2) \leq L_{low}} (L_{low} - P_{ref-p}(t)) dt \quad (11)$$

式中: E_{pe} 、 E_{va} 分别为设立功率平抑上下界限后,储能系统削峰需要吸收的能量以及填谷所需要释放的能量; k_1 、 k_2 分别为取值时间段内风储联合系统出力大于功率上限阈值的时间段数和小于功率下限阈值的时间段个数。

2.1.4 削峰率

其次需要具体指标衡量削峰填谷的实际效果,设置削峰率指标来反映削峰效果。

削峰率 λ_{pc} 为

$$\lambda_{pc} = \left(\frac{\max(P_{wind}(t)) - \min(P_{wind}(t))}{\max(P_{wind}(t))} - \frac{\max(P_{ref-rc}(t)) - \min(P_{ref-rc}(t))}{\max(P_{ref-rc}(t))} \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中: $P_{ref-rc}(t)$ 为风储系统并入电网的最终功率; \max 和 \min 分别是最大值、最小值函数。

2.1.5 稳定性

风力不足时,需要电池储能系统放电来维持系统发力稳定,风力过大时,电池储能系统充电来维持系统发力稳定,故需要定义稳定性来衡量系统维稳效果。

稳定性 λ_s 为

$$\lambda_s = \left(\omega_1 \frac{E_B}{E_{va}} + \omega_2 \frac{E_B}{E_{pe}} \right) \times 100\% \quad (13)$$

式中: ω_1 、 ω_2 为权重系数,根据当地的实际情况设定(权重由当地具体的弃风难易程度确定,越难则 ω_1 越大,反之 ω_2 越大,且二者和始终为1)。

2.1.6 上层模型目标函数

将上述指标(可视为约束条件)进行权重考虑后,得出上层模型的具体表达式

$$\begin{cases} I_{Re} = v_1 \eta_{p-e} + v_2 (1 - \lambda_{pc}) + v_3 \lambda_s \\ \sum_{i=1}^3 v_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: I_{Re} 为最终的上层模型函数; v_i 为各项所占权重,由于大规模风电场存在集群效应,可以一定程度上平滑最终的输出波动,故这里可降低 v_1 占比,关注最终的削峰率与稳定性。而这里削峰率一般为低于0.5的数值,为了函数的最终效果,取其在1内的互补数作为变量。

2.2 储能的经济性方案配置模型

2.2.1 下层模型目标函数

在上层模型搭建完成后,功率型锂电池与容量型液流电池的配比将会大大影响最终方案的成本高低,锂电池在功率上的占比越大则综合系统平抑效果越好,液流电池在容量上的占比越大则系统的调峰能力越好,但功率与容量不能完全独立配置,锂电池功率上升到一定规模,容量也必然有所提升,液流电池也是如此,但锂电池在容量储存与液流电池在功率调节上都有缺陷,会导致成本激增。

本小节基于功率型锂电池在功率调节上的灵活性以及容量型液流电池在容量储存上的易规模

化性，提出下层经济配置模型，达到经济最优效果。

目标函数如下

$$\min L_Y = \min \left(\frac{c_{\text{initial}} + \sum_{y=0}^Y c_{\text{operating}_y}}{\sum_{y=0}^Y E_{\text{discharged}_y}} \right) \quad (15)$$

式中： L 为储能平均使用成本； Y 指规定使用年限； c_{initial} 指储能的初始投资成本； $c_{\text{operating}}$ 指储能的后续运行维护成本； $E_{\text{discharge}}$ 指在储能设备的运营年限内一共释放了多少能量；下标 y 为当前年限。

具体成本的计算式如下：

初始投资成本是指储能系统工程投建初期一次性投入的固定资金，通常用于主要设备的购置等，考虑资金的时间价值（等值年系数），以及锂电池与液流电池参数特性后的计算公式为^[15]

$$c_{\text{initial}} = C(r, n) [(C_{P-\text{Li}} P_{\text{Li-ion}} + C_{E-\text{Li}} E_{\text{Li-ion}}) + (C_{P-\text{VRB}} P_{\text{VRB}} + C_{E-\text{VRB}} E_{\text{VRB}})] \quad (16)$$

$$C(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (17)$$

式中： $P_{\text{Li-ion}}$ 、 $E_{\text{Li-ion}}$ 、 P_{VRB} 、 E_{VRB} 分别为锂电池与液流电池配置的功率和容量； $C_{P-\text{Li}}$ 、 $C_{P-\text{VRB}}$ 、 $C_{E-\text{Li}}$ 、 $C_{E-\text{VRB}}$ 分别为锂电池与液流电池的功率和容量的单位投资； r 为基准折现率； n 为运行的期限。

运行维护成本是指为保障储能系统在寿命期内正常运行而动态投入的资金，通常包括储能系统的试验、安装、损耗、停运、人力、检修和维修等费用，以年为单位，一般按初始投资的一定比例近似估算，即

$$c_{\text{operating}} = C(r, n) (\mu_{P-\text{Li}} C_{P-\text{Li}} P_{\text{Li-ion}} + \mu_{E-\text{Li}} C_{E-\text{Li}} E_{\text{Li-ion}} + \mu_{P-\text{VRB}} C_{P-\text{VRB}} P_{\text{VRB}} + \mu_{E-\text{VRB}} C_{E-\text{VRB}} E_{\text{VRB}}) \quad (18)$$

式中： $\mu_{P-\text{Li}}$ 、 $\mu_{E-\text{Li}}$ 、 $\mu_{P-\text{VRB}}$ 、 $\mu_{E-\text{VRB}}$ 分别为实际计算过程中锂电池与液流电池的功率和容量的维护系数。

2.2.2 下层模型约束条件

1) 容量限制。

锂电池与液流电池中必有一类参与平抑功率工作，因此有以下时间限制：

$$\begin{cases} E_{\text{Li-ion}} \geq 0.25 P_{\text{Li-ion}} \\ E_{\text{VRB}} \geq 0.25 P_{\text{VRB}} \end{cases} \quad (19)$$

2) 功率限制。

进行削峰填谷时，也需要保证电池功率出力有充足的裕度，否则不能满足配置需求。

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_{\text{Li-ion}} \leq P_{\max} \\ P_{\min} \leq P_{\text{VRB}} \leq P_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中： P_{\min} 、 P_{\max} 为功率的最小、最大限制，不在此功率区间储能配置不能达到应有效果。

3) 充放电深度限制。

$$\underline{S} \leq S \leq \bar{S} \quad (21)$$

式中： \bar{S} 、 \underline{S} 分别为电池荷电状态上下限。

4) 储能死区时间限制^[16]。

在充放电过程中，难免会有过度充放电的存在，这里我们将其定义为死区时间。

$$\begin{cases} T_d = \Delta t \times \sum_{t=1}^N \left[f\left(\frac{S}{\bar{S}}\right) \cup f\left(\frac{S(t)}{\bar{S}}\right) \right] \\ f(x) = \begin{cases} 1, x \geq 1 \\ 0, x < 1 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

式中： T_d 为储能进入死区时间。若 S 处于上下限之外，则储能系统进入死区。

本文所提双层模型如附图 A1。

3 模型求解算法

本文所得最终配置方案需在上下层模型中多次迭代，上下层模型计及变量及约束条件较为复杂，故采用免疫算法来求解该储能配置模型。

在上层模型中，以最终计及多个影响因素的综合可靠性指标函数为目标（即抗原）。抗体为电池储能系统所相应配置的功率及容量。其抗体对于抗原的亲合度以及抗体的浓度函数如式（23）（24）。

$$A_v = \frac{1}{F} \quad (23)$$

式中： F 是 v 对应的目标函数值最小值； A_v 越大，越希望保留。

$$\begin{cases} C_v = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_1(g_i, g_j) \\ S_1(g_i, g_j) = \begin{cases} 1, L_{\text{aff}}(g_i, g_j) < \delta_s \\ 0, L_{\text{aff}}(g_i, g_j) \geq \delta_s \end{cases} \end{cases} \quad (24)$$

式中： L_{aff} 为抗体向量间的欧式距离； N 为抗体基因总数； δ_s 为给定具体值； g 表示抗体上的基因。

在下层模型中,以储能平均使用成本最小为目标。抗体此时变为具体电池间功率及容量的配比关系。最后抗体的期望繁殖率如式(25)。

$$P = a \frac{A_v}{\sum A_v} + (1-a) \frac{C_v}{\sum C_v} \quad (25)$$

式中 a 为权重值取值范围为 $[0,1]$ 。

相关流程如附图 A2 所示,具体求解步骤如下:

1) 模型初始化。将模型中所需要的具体原始参数输入,比如风电场运行功率,配网运行参数等,设置免疫算法的迭代次数,以及规划抗体的空间。

2) 上层模型初始化。将上层模型中的抗体空间清除,并对记忆细胞中所保存的优质抗原进行重置,使其各部分初始值均为零,随机生成初始抗体。

3) 上层抗体更新。功率与容量均用二进制公式迭代更新,同时计算并判断现有抗体的亲和力与浓度以及迭代次数是否达到上限,若抗体的亲和力与浓度达到一定比例后,由记忆细胞进行抗体保存,剩下的则被当成病毒消灭处理。

4) 下层模型初始化。与上层模型初始化相同,分别初始化抗原及抗体的空间,对记忆细胞进行重置。

5) 下层抗体更新。更新下层抗体的方法与步骤3)类似,同时计算抗体亲和力、浓度,期望繁殖率,最后根据繁殖率进行更新交替。

6) 下层模型迭代次数判断。判断此时的迭代次数是否已经达到设置值,如满足则转到步骤7),不满足则跳回5)继续优化迭代。

7) 上层模型函数值更新,根据下层所给出的最终抗体计算上层目标函数的值,并对其中参数进行相应更新。

8) 上层模型迭代次数判断。判断此时迭代次数是否达到设置值,如满足则输出最终抗体值,不满足则跳回步骤3)继续优化迭代。

4 具体算例分析

4.1 电池特性参数

电池详细参数如表1所示。

4.2 储能配置方案性能分析

算例数据采用山东某风电场(400 MW)实际运行一年的历史数据来验证本文所提储能配置方

表1 电池详细参数

Table 1 Detailed parameters of the battery

参数	锂电池	液流电池
充放电深度上限/%	80	95
充放电深度下限/%	20	5
储能的单位功率年运维成本系数/(USD/MW)	0.117	0.108
储能的单位容量年运维成本系数/(USD/MW·h)	0.112	0.106
储能的单位功率年建造成本系数/(USD/MW)	950	2160
储能的单位容量年建造成本系数/(USD/MW·h)	960	530
充放电效率/%	90	70
自放电率/%	1	0
寿命/(次/年)	300	600

案的可靠性与经济性。

4.2.1 可靠性分析

储能配置的限制条件如表2所示。基于不同算法下混合配置方案如表3所示。

表2 储能限制指标参数

Table 2 Energy storage restricted indices and parameters

指标	数值
$I_{Re}/\%$	80
$v_1/\%$	(0,20]
$v_2/\%$	[40,50]
$v_3/\%$	[40,50]
$L_{high}/L_{low}/MW$	70/30
T_d/h	[0,0.5]
$\omega_1/\%$	60
$\omega_2/\%$	40

表3 算法配置方案对比

Table 3 Comparison of algorithm configuration schemes

算法	P_{Li-ion}/MW	$E_{Li-ion}/MW·h$	P_{VRB}/MW	$E_{VRB}/MW·h$	L_V/USD	T_d/h
免疫	45	21.067	23	195.497	251.201	0
粒子群	46	23.988	21	188.657	257.322	0.2
遗传	50	27.634	18	180.022	260.028	0.5

从表3和图2可以看出3种启发式算法均能比较成功地解决储能的配置问题,方案结果较为接近,其中免疫算法得到结果最优,粒子群算法次之,遗传算法效果较差。这是由于粒子群算法虽然通用性较强且能保存优质解,但较容易早熟收敛。而遗传算法除了存在早熟收敛的问题外,不能保存优质解而且计算过程也较为复杂。相比之下,免疫算法在每一步迭代中都能保存优质解

而且克服了早熟收敛的缺点，优越性更加突出，这也是本文选择免疫算法作为主算法的主要原因。

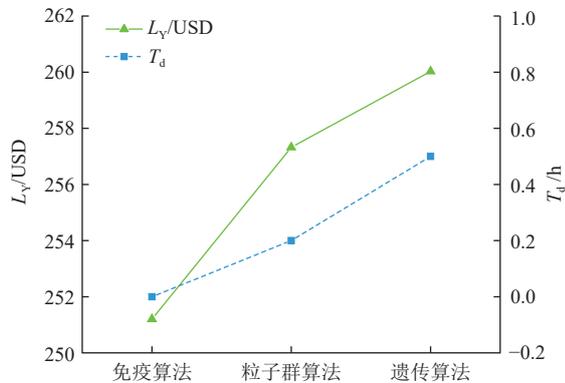


图 2 算法对比

Fig. 2 Algorithm comparison

根据本文利用免疫算法所计算出的功率补偿后，可以得到风电场出力的改善情况如图 3 所示。

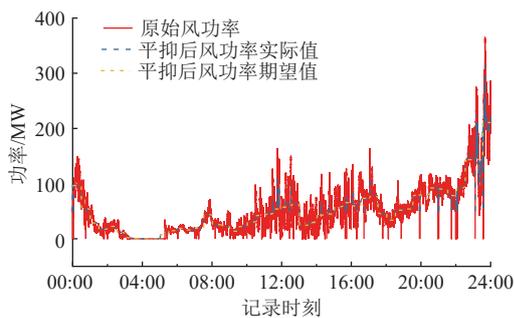


图 3 功率平抑前后风电场出力对比

Fig. 3 The output of power compensated wind farms comparison

短时功率波动平抑后，对出力曲线进行进一步补偿即削峰填谷，如图 4 所示。

从图 3 可以看出，经过功率补偿后，出力功率曲线在分钟-小时级的短时间尺度范围上波动基本消失，与所计算期望值基本一致，有部分与

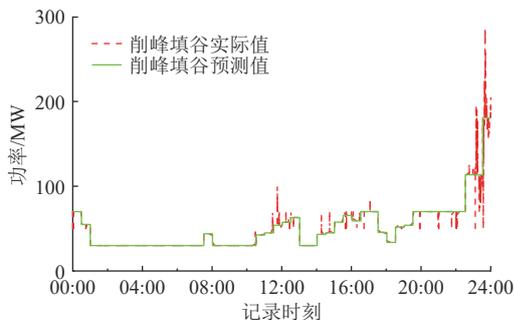


图 4 削峰填谷风电场出力对比

Fig. 4 Comparison of peak-load shifted wind farm output

期望值有所偏差，是由于电池的充放电功率限制所导致。

从图 4 可以看出，经过电池储能系统对于风电场出力的削峰填谷后，出力曲线得到了进一步的改善，在小时-天级较长时间尺度范围上功率波动得到了有效平抑，最终的风场出力也更加光滑。

工作情况中电池的 SOC 如图 5 所示。

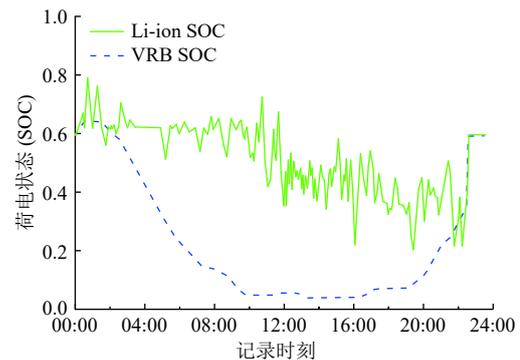


图 5 荷电状态

Fig. 5 State of charge

从图 5 可以看出，在电池储能系统工作时，锂电池的荷电状态在分钟-小时级的时间区域内波动幅度大，在小时-天级的波动幅度小，而液流电池恰好相反，是在小时-天级下波动较大，分钟-小时级下波动较小。这也充分证明了这二者充分工作在自己的优势领域，锂电池功率调节性强适合进行短时性功率平抑，而液流电池容量储存大，适合长时性削峰填谷，最终结果也与初始分析特性相吻合。

工况中电池的功率出力状态如图 6 所示。

图 6 所得仿真结果也进一步证明了图 5 所得结论的正确性，在一天的工作时间范围中，锂电池的功率波动范围较大，但从图中可以明显看出功率是在 0 的上下来回波动，这样的短时大幅度

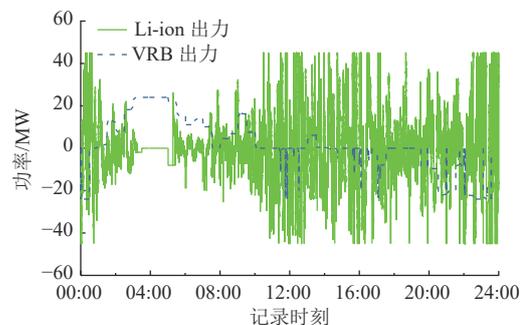


图 6 电池出力功率

Fig. 6 Battery output power

波动对于本身的SOC改变也不明显,而液流电池的功率出力在短小时内基本保持固定,在该时间段内或充或放电,这样对SOC变化较为明显。结果又一次表明,在最终的工作状态中,锂电池的功率调节与液流电池的容量储存优势都得到了非常好的利用。

综上,本文所提方案具有良好的可靠性,可以满足最终新能源场站对于储能的需求。

4.2.2 经济性分析

为了验证本文所提配置方案的经济性,现将不同锂电池与液流电池配比的储能配置方案的 L_Y 与本文方案进行对比,具体如表4所示。

表4 不同种类电池配比下的经济成本对比
Table 4 Comparison of economic costs under different proportions of the two kinds of batteries

锂电池功率占比/%	锂电池容量占比/%	液流电池功率占比/%	液流电池容量占比/%	L_Y /USD
100	100	0	0	440.020
88.5	55.6	11.5	44.4	309.786
82.3	38.5	17.7	61.5	278.877
66.2	9.7	33.8	90.3	251.201
44.1	6.5	55.9	93.5	274.965
29.4	4.4	70.6	95.6	290.500
0	0	100	100	320.854

表4表明,在一定范围内随着锂电池功率与液流电池容量占比率的增加, L_Y 逐渐下降,达到最佳配比后,成本又再次提升,拐点与本文计算方案一致,原因在于在初始增加锂电池功率比或液流电池容量比时,由于二者的经济优势会使成本得到明显下降,但比率增大到一定状态下时,由于功率与容量不能完全独立,彼此之间会相互影响,配置不可能达到功率很大,而容量接近与0的状态,所以此时继续分别增加二者配比不符合现实规律,导致成本再次上升。

5 结论

1) 为解决风电场储能配置问题,本文在建立电池性储能系统模型的基础上,提出了双层储能配置优化模型,得出了符合要求的最优储能配置方案。

2) 利用山东某风电场的实际系统数据进行仿真,进行了储能配置。计算得出功率型锂电池

与容量型液流电池在功率上的最佳配比约为2:1,而在容量上的最佳配比约为1:9,进一步可以得出此混合配置方案比单一电池配置方案的经济性更为优越,提升约为42.95%和21.81%,证明了此储能配置方案能在可靠性与经济性间达成较好的平衡状态。

3) 本文只考虑了理想状况下电池的固定年限,但在实际情况中,电池寿命受多方面环境因素影响,后续考虑设计相应环境参数变量,将电池的寿命模型优化为计及上述变量的一般性函数,提升模型的有效性。

(本刊附录请见网络版,印刷版略)

参考文献

- [1] 胡洋,马溪原,雷博,等. 储能促进南方电网地区新能源消纳的可行性研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(9): 53-61. HU Yang, MA Xiyuan, LEI Bo, *et al.* Feasibility study on energy storage promoting new energy consumption in China Southern Power Grid Area[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(9): 53-61(in Chinese).
- [2] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3471-3477. XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, *et al.* A review on the operation and configuration of energy storage systems for smoothing wind power output[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3471-3477(in Chinese).
- [3] 孙波,吴旭东,谢敬东,等. 基于信息间隙决策理论的综合负荷聚合商储能优化配置模型[J]. 现代电力, 2021, 38(2): 193-204. SUN Bo, WU Xudong, XIE Jingdong, *et al.* Optimal configuration of energy storage for integrated load aggregator based on information gap decision theory [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(2): 193-204(in Chinese).
- [4] 王世震,窦迅,王俊,等. 考虑微电网群和系统经济运行的配电网储能优化配置[J/OL]. 现代电力[2021-06-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3818.TM.20210630.1512.001.html>. WANG Shizhen, DOU Xun, WANG Jun, *et al.* Energy storage optimization configuration of distribution network considering microgrid clusters and system economic operation [J/OL]. Modern Electric Power[2021-06-30] (in Chinese). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3818.TM.20210630.1512.001.html>.
- [5] HOU Tingting, DING Heng, LIU Jianqin, *et al.* Sizing

- pumped hydro storage plant considering environment benefit contribution in power system with wind power integration[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). IEEE, 2019: 831-836.
- [6] HOU Tingting, CUI Yanzhao, LI Yujia, *et al.* Sizing battery energy storage for wind farms based on wind power forecast uncertainty in the bulk power system[C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2016: 1548-1552.
- [7] WU Xiaogang, XU Kangtai, WANG Zhentai, *et al.* Optimized capacity configuration of an integrated power system of wind, photovoltaic and energy storage device based on improved particle swarm optimizer[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI²). IEEE, 2017: 1-6.
- [8] 夏成军, 梁君君, 宋旭东, 等. 考虑光伏发电及负荷概率性的储能容量优化[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 46-52.
XIA Chengjun, LIANG Junjun, SONG Xudong, *et al.* Energy storage capacity optimization considering the probability of photovoltaic power generation and load[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 46-52(in Chinese).
- [9] LIAO Shengtao, SU Kangbo, YU Qian, *et al.* Optimal capacity allocation for wind-solar station considering power response of pumped storage[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI²). IEEE, Changsha, China, 2019: 2053-2058.
- [10] 刘力静, 安向阳, 唐早, 等. 考虑分布式发电增长模式的电池储能系统多阶段容量配置方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(6): 54-61.
LIU Lijing, AN Xiangyang, TANG Zao, *et al.* Multi-stage allocation method of battery energy storage system considering growth mode of distributed generation[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 54-61(in Chinese).
- [11] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 风光氢耦合发电系统的容量优化配置及日前优化调度[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 80-87.
JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, *et al.* Capacity optimization allocation and day-ahead optimal dispatch of wind-light-hydrogen coupled power generation system[J]. China Electric Power, 2020, 53(10): 80-87(in Chinese).
- [12] 李滨, 陈姝, 韦化, 等. 风电场储能容量优化的频谱分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2128-2134.
LI Bin, CHEN Shu, WEI Hua, *et al.* Spectral analysis method for wind farm energy storage capacity optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2128-2134(in Chinese).
- [13] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, *et al.* Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 44-50(in Chinese).
- [14] 王磊, 冯斌, 王昭, 等. 计及电池储能寿命损耗的风光储电站储能优化配置[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(5): 1-6.
WANG Lei, FENG Bin, WANG Zhao, *et al.* Optimal configuration of energy storage in scenic storage power plants accounting for battery storage life loss[J]. Power Science and Engineering, 2019, 35(5): 1-6(in Chinese).
- [15] 饶宇飞. 分布式电池储能系统优化配置与调度技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [16] 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.
XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, *et al.* Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270(in Chinese).

收稿日期: 2021-09-01

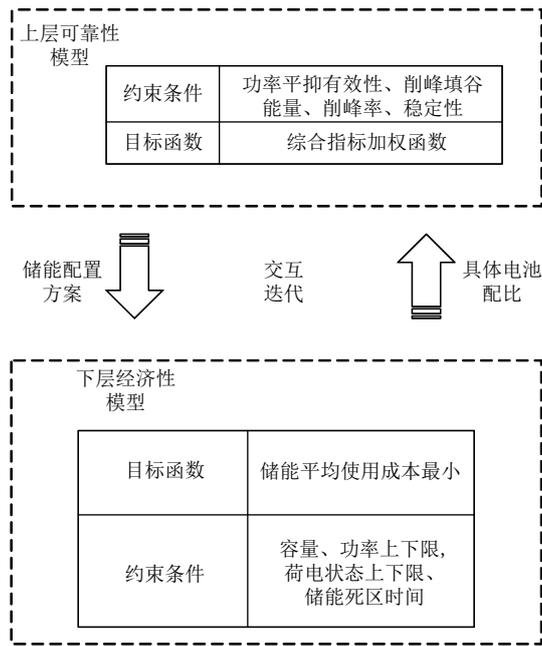
作者简介:

韩晨阳(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电系统的分析与控制, E-mail: 847936519@qq.com;

张鹏(1976), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制, E-mail: hdbjmoonbird@ncepu.edu.cn;

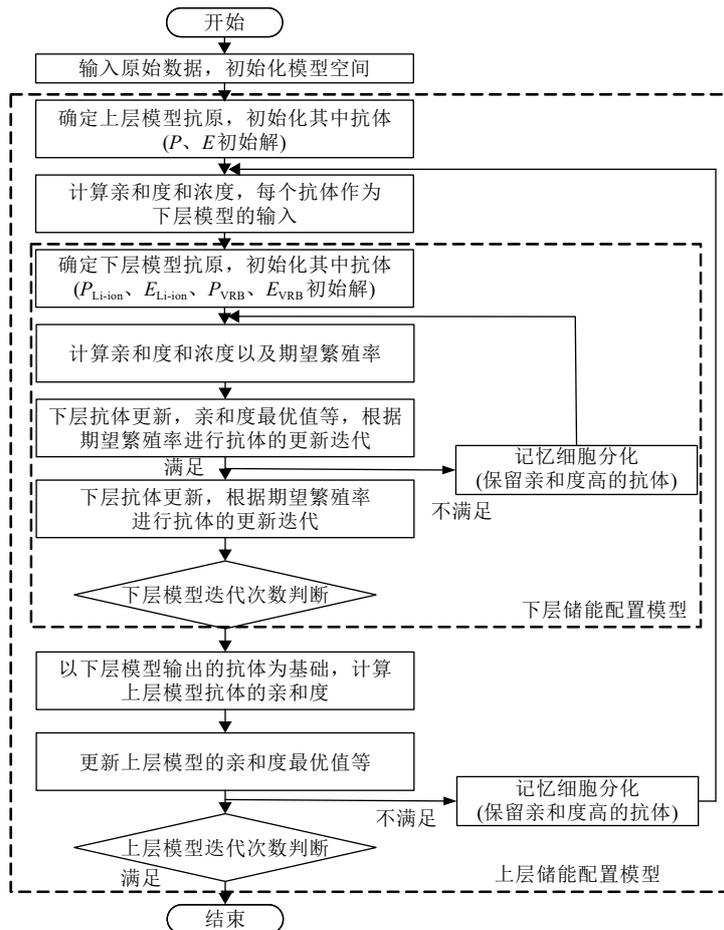
徐金华(1998), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电系统的分析与控制, E-mail: xujinhua1012@163.com.

附录 A



附图 A1 附图 A1 双层模型结构

Fig. A1 Structure of bi-level model



附图 A2 附图 A2 算法流程

Fig. A2 Flowchart of the algorithm