



# 基于遗传蚁群的光储电站运行效益提升策略研究

曹雅琦<sup>1</sup>, 赵波<sup>1</sup>, 王丽婕<sup>1</sup>, 李相俊<sup>2</sup>, 高彬桓<sup>3</sup>

(1. 北京信息科技大学, 北京 100192; 2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 以并网光储电站为研究对象, 以充分发挥储能系统灵活调节作用并提高系统运行经济性为出发点, 在考虑度电成本的基础上, 提出一种实时调整储能系统运行状态的控制策略, 建立以净收益最大、向大电网取电量最少为目标的优化模型, 采用基于精英策略的带有惩罚函数的遗传-蚁群算法对优化模型进行求解, 从投资人角度对并网光储系统进行投资收益分析。最后通过对江苏省某地区实际数据仿真分析, 给出该地区“光伏+储能”优化控制策略及其经济效益分析结果, 验证了该模型及算法的可行性。

**关键词:** 光伏+储能; 储能实时优化控制策略; 运行经济效益; 净现值; 投资回笼期

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202101001

## 0 引言

光伏发电 (photovoltaic, PV) 具有随机性、波动性和间歇性等特点, 为更好保证负载稳定运行并减小其并网时带给大电网的冲击, 考虑引入大容量电池储能系统 (battery energy storage system, BESS), 利用 BESS 动态吸收能量并适时释放的特点<sup>[1-2]</sup> 提升电力系统稳定度、电力消纳完整性并实现削峰填谷。同时在中国现行“自发自用, 余电上网”模式下, “光伏+储能”可通过获得全发电量国家补贴为投资者带来更大收益。目前国内已有多个“光伏+储能”示范项目投入使用。但随着近几年标杆上网电价逐渐下调, 可以预见光伏并网补贴下调是一种必然趋势, 如何通过调整 BESS 运行控制策略 (operation control strategy, OCS) 并最大限度实现系统运行期间效益最大化, 是当下应迫切考虑的问题。

在 BESS 充放电控制策略方面, 文献<sup>[1-2]</sup> 采

用恒功率控制策略 (constant power control strategy, CPCS) 法, 通过改变日运行充放电次数以增强算法简便性并达到削峰填谷的目的, 但这种方式使得 BESS 容量不能得到最大限度的发挥, 部分电池长时间处于静置状态造成冗余, 同时也会增加弃光概率, 经济性较差; 文献<sup>[3-4]</sup> 以最大限度消纳新能源发电功率、最低限度改变 BESS 充放电功率波动为目标对模型进行优化控制, 追求 BESS 的连续运行性; 文献<sup>[5-6]</sup> 以平抑负荷功率波动为目标, 建立变功率控制下的 OCS, 通过改变削峰率以达到理想化的削峰填谷。文献<sup>[1-6]</sup> 通过动态规划的方法, 根据实际需要对比 BESS 状态进行灵活控制以满足系统各方面要求, 但均未从投资人角度出发, 以运行效益最大化为目标对系统展开讨论, 投资回收期较长。文献<sup>[7-9]</sup> 对系统成本及收益模型进行了全面的考虑; 文献<sup>[10-12]</sup> 对储能模型约束条件进行了分析, 以实现经济效益最大化目标建立了多种约束下的储能充放电调度模型, 以实现运行效益最优; 但文献<sup>[7-12]</sup> 均未考虑度电成本与购电成本间的关系, 并未将其作为 BESS 充放电判断依据, 无法为投资人提供确切的运行决策参考。因此需要综合考虑各方面因素并通过后期运行控制, 提高收益并缩短投资回笼期。

在模型求解方面, “光伏+储能”经济运行模型求解过程烦琐难以寻求最优解<sup>[13]</sup>, 现有文献尝

**收稿日期:** 2021-01-05; **修回日期:** 2021-04-05。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (基于数值天气预报信息融合的并网风电场短期发电功率预测研究, 51607009); 新能源与储能运行控制国家重点实验室开放基金资助项目 (大容量储能电站等值模型及特征参数识别技术研究, DGB51201901183); 北京市属高校高水平教师队伍支持计划青年拔尖人才培养计划 (CIT&TCD 201804053)。

试采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) [2,14-15]、粒子群算法 [16]、蚁群算法 (ant colony optimization, ACO) [17] 等启发式算法进行非线性问题的多目标求解。其中 GA 具有快速搜索能力, 但对于系统中反馈信息利用率较低 [15]; ACO 通过信息素累积和更新使之收敛于最优解, 具有全局收敛能力, 但初期信息素较为匮乏, 算法速度较慢 [16]。这些方法并不适用于“光伏+储能”, 需要实时优化调整动态运行工况, 因此在求解算法方面仍有待改进。

综上所述, 为充分发挥电站灵活调节作用和提高已有电站的运行经济性, 本文在考虑度电成本的基础上, 提出一种实时调整 BESS 运行状态的控制策略, 建立以净收益最大、总成本最小、向大电网取电量最少为目标的优化模型, 采用基于精英策略的带有惩罚函数遗传蚁群算法 (genetic and ant colony algorithm with elite strategy and penalty function, EP-GA) 进行模型求解, 最后通过实例来验证模型及算法的正确性和可行性。

## 1 考虑度电成本的系统运行策略

### 1.1 基本运行策略

储能系统是通过进行调峰调频、促进可再生能源消纳的重要手段, 而储能系统的度电成本则是决定储能技术应用和储能电站经济性的重要指标。

度电成本也称平准化成本 (levelized cost of electricity, LCOE), 是指在全生命周期内 BESS 的总成本与总电能处理量进行平准化后, 系统充放 1 kW·h 电能所对应的投资成本 [17], 可表示为

$$LCOE = \frac{C_{sum}}{E_{sum}} = \frac{C_{sum}}{nD_{OD}\eta\xi} = \frac{C_{sum}}{nD_{OD}\eta \cdot \frac{\int_1^n [1 - (N-1)\frac{1-\varepsilon}{n}] dN}{n}} = \frac{C_{sum}}{D_{OD}\eta \cdot \int_1^n [1 - (N-1)\frac{1-\varepsilon}{n}] dN} \quad (1)$$

式中:  $L_{COE}$  为度电成本;  $C_{sum}$  为全生命周期内 BESS 的总成本;  $E_{sum}$  为该周期内 BESS 处理的电量之和;  $D_{OD}$  为电池的放电深度;  $N$  为运行年度;  $n$  为在该放电深度下电池的总循环次数;  $\eta$  为电池的能量转换效率;  $\xi$  为经过  $n$  次循环后电池

容量的平均保持率, 即各单次循环容量保持率之和的平均值;  $\varepsilon$  为电池寿命终止时的容量保持率, 可用来评判电池容量的衰减速度。

据统计, 目前电池度电成本约为 0.5~0.8 元/(kW·h), 距离规模化应用的目标成本 0.3~0.4 元/(kW·h) 仍存在一定距离 [17]。

由式 (1) 可知, 电池的能量转换效率越高、可循环使用次数越多、电池老化衰退速度越慢、总成本越小时, 相应的 LCOE 就会越低; 但放电深度对其影响无法从式 (1) 中直接得出, 这是因为过高的放电深度将会加速电池的容量衰减、降低其循环使用寿命并缩短电池的使用年限, 因此会进一步减小全生命周期内电池总处理电量值。度电成本过高将直接影响储能系统的运行收益, 因此当研究考虑经济效益在内的系统运行控制方式时, 应当计及度电成本对系统的影响, 将度电成本与购电电价的比较结果作为控制电池运行状态的判断条件之一。

负荷侧“削峰填谷”型储能系统接入示意如图 1 所示 [18], 在分时电价下可通过对 PV 出力、用电负荷、电价波动等监控并实时调整 OCS, 达到平抑负荷功率波动并实现峰谷套利的目的。

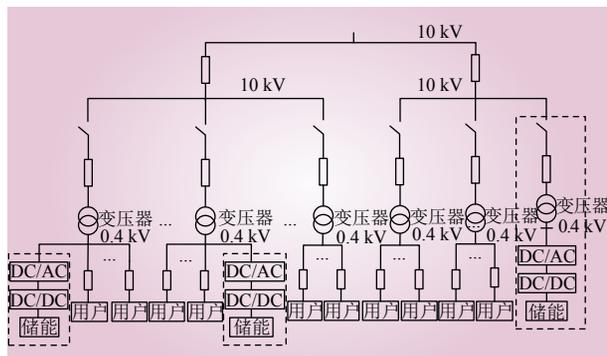


图 1 削峰填谷用电池储能系统接入示意

Fig. 1 Schematic diagram of battery energy storage system connection for peak shaving and valley filling

系统控制流程如图 2 所示, 高/尖峰电价时段, 若光伏发电功率已全部消纳且无法满足负荷需求时, 通过控制 BESS 放电或向上级购电以满足用电需求, 若度电成本高于高峰电价, 则不考虑电池放电行为; 谷电价时段, 考虑通过光伏发电或向上级购电为系统充电, 同时在该时段不考虑放电行为; 平电价时段, 通常不考虑充电及放电行为, 但当光伏出力不足以支撑供电时, 可在

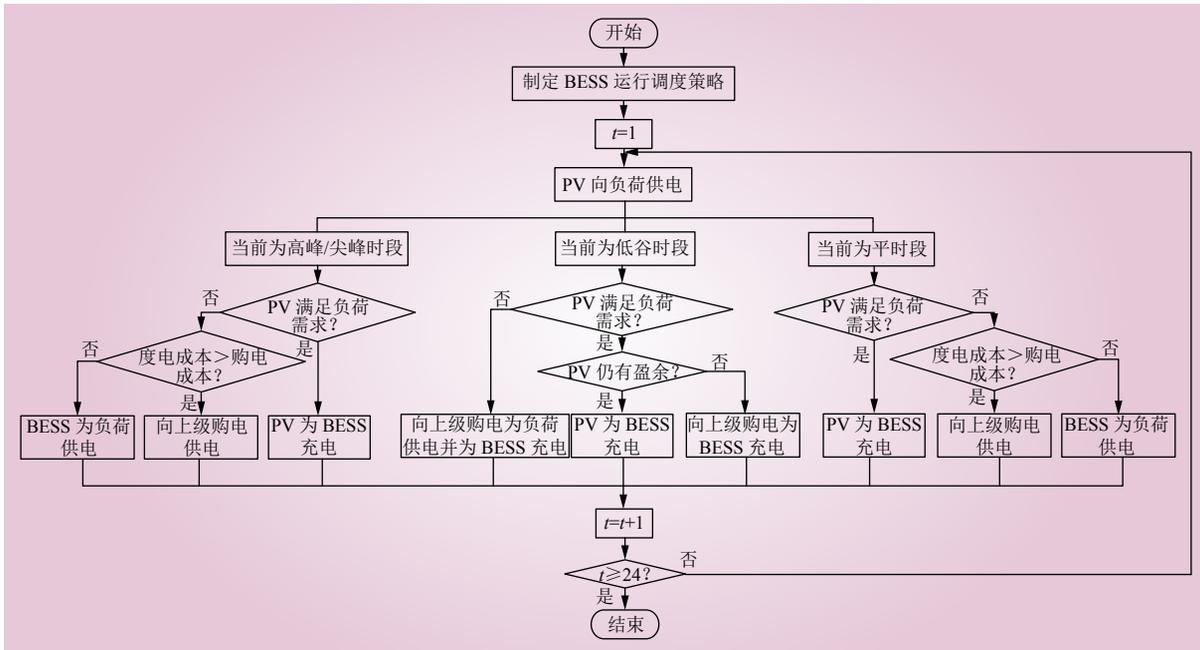


图 2 并网光储系统基本运行策略

Fig. 2 Basic operation strategy of grid-connected optical storage system

度电成本低于购电成本的情况下进行放电操作。

BESS 在充放电过程中始终满足

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} - \frac{P_B \Delta t}{S_N} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $P_B$ 、 $S_N$  分别为 BESS 功率及额定容量； $\Delta t$  为时间间隔。

以江苏光伏出力特性及该地区某企业典型日特征负荷数据为例进行优化控制，本文所提策略及常规工程应用的两充两放控制策略下的 BESS 充放电示意如图 3 所示。从图 3 可以看出，在本文所提策略下 BESS 不仅限于在高峰电价时段进行放电，在平、低谷电价时段充电，可做到及时分析负荷需求与光伏出力之间的关系并对电池充放电状态实时调整，同时该策略较两充两放策略在夜间的充电速度更为均衡，能避免充电倍率过高对电池寿命衰减带来的影响。

### 1.2 考虑电池寿命衰减的系统多目标优化

为使系统更具有经济性，建立以净收益最大、向大电网取电量最少为目标的“光伏+储能”运行优化模型，目标函数为

$$\begin{cases} \min f(x) = \phi_0 [\max(P_{load}) - \max(P_{load} - P_{ess,t})] \cdot \\ \quad 24 + \sum_t P_{ess,t} \cdot \phi_t \Delta t \\ \max R_n = S_0 - C_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $f(x)$ 、 $R_n$  分别为净收益年值以及向大电网购电量的价格函数； $\phi_0$  为基本电价； $P_{load}$ 、

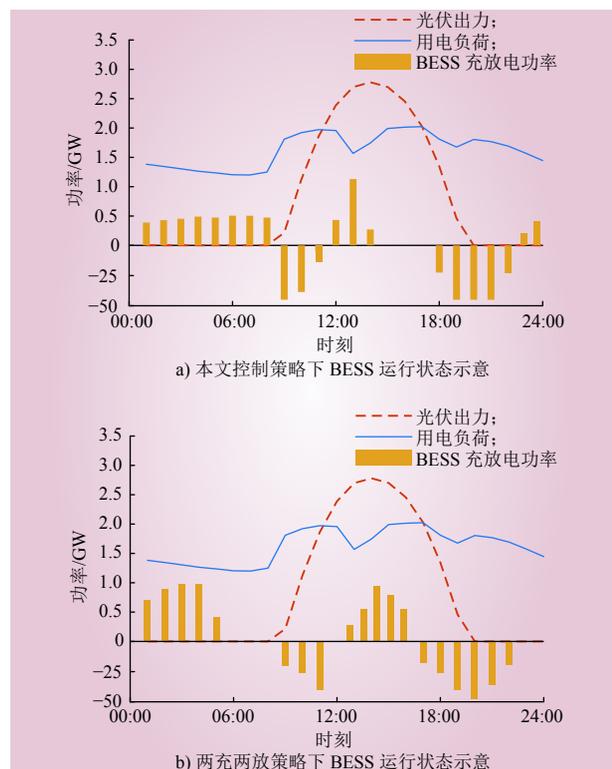


图 3 不同控制策略下 BESS 充放电示意

Fig. 3 Schematic diagram of BESS charging and discharging under different control strategies

$P_{\text{ess},t}$  分别为用电负荷功率及第  $t$  个时段的储能出力;  $\phi_t$  为分时电价;  $S_0$ 、 $C_0$  分别为储能系统的投资收益和投资成本, 其中系统的投资收益包括利用高发低储套利所产生的收益、政府补贴及回收价值, 投资成本包括设备投资建设的一次成本以及用于系统投入运营后维护、电池更换及在项目运营期内由于长期贷款产生利息等带来的二次成本。投资收益及成本可分别表示为

$$S_0 = \sum_{D=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} [P_{\text{dis}}(t)B_{\text{dis}}(t) \cdot (\phi_t + k_e) - P_{\text{ch}}(t)B_{\text{ch}}(t) \cdot \phi_t] + \gamma(k_p P_B + k_q S_N) \quad (4)$$

$$C_0 = (k_p P_B + k_q S_N) + (k_{\text{om}} + k_{\text{bat}}) \cdot P_B + C_r \quad (5)$$

式中:  $D$  为天数;  $t$  为时刻;  $B_{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{\text{ch}}(t)$ 、 $B_{\text{dis}}(t)$ 、 $P_{\text{dis}}(t)$  分别为电池在  $t$  时刻的充/放电状态与实际放电功率;  $k_e$  为政府给予的单位电价补贴价格;  $\gamma$  为电池回收系数;  $k_p$  为储能电池本体的单位容量成本;  $k_q$  为 PCS 的单位功率成本;  $k_{\text{om}}$  为单位功率下的年运维费用;  $k_{\text{bat}}$  为电池置换次数;  $C_r$  为财务成本。

在储能电池实际使用过程中, 主要考虑由于频繁进行深度不定的充放电操作给电池寿命带来的影响<sup>[19-20]</sup>。等效变换法可将电池在不同充放电深度下的充放电循环次数等效至满充满放状态下的循环次数, 从而可对 BESS 在实际运行过程中的等效寿命进行估算, 并可估算所需电池置换次数。

当电池第  $i$  次以深度  $D$  进行充放时, 其等效寿命折损率  $\Delta L_{i,D}$  可以表示为

$$\Delta L_{i,D} = \frac{N_0}{N_{i,D}} \quad (6)$$

式中:  $N_{i,D}$  为电池第  $i$  次以深度  $D$  为满充满放循环标准时的总循环次数;  $N_0$  为标准充放电深度下的总循环次数。

$N_{i,D}$  可量化为

$$N_{i,D} = a_1 + a_2 e^{-a_3 \cdot D} + a_4 e^{-a_5 \cdot D} \quad (7)$$

式中:  $a_1 \sim a_5$  为拟合系数, 可在 Matlab 中通过对电池厂商提供的实际电池寿命测试数据进行回归拟合得到。BESS 循环寿命与其放电深度 (depth of discharge, DOD) 的典型关系如图 4 所示。

若能计算出  $\Delta L_{i,D}$ , 则可测算得到相应 BESS 等效寿命  $T_{\text{eq}}$ , 该测算值可为 BESS 运行控制策略

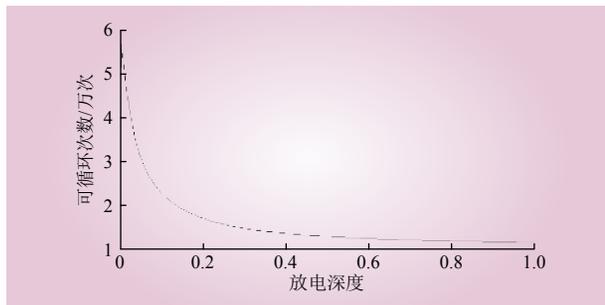


图 4 BESS 可循环次数与放电深度关系

Fig. 4 The relationship between the number of cycles of the energy storage system and the depth of discharge

的可用性及经济效益分析提供理论参考。

$$T_{\text{eq}} = \frac{1}{365 \times \sum \Delta L_{i,D}} \quad (8)$$

上述模型在任意时刻  $t$  应满足约束条件为

$$\begin{cases} 0 < P_{\text{ess},t}^c < P_{\text{ess},\text{max}}^c \\ 0 < P_{\text{ess},t}^d < P_{\text{ess},\text{max}}^d \\ S_{\text{start}} = S_{\text{end}} \\ S_{t-\Delta t} + S_{\Delta t} = S_t \\ Q_{\text{min}} \leq Q_t \leq Q_{\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{ess},t}^c$ 、 $P_{\text{ess},\text{max}}^c$  分别为 BESS 当前时刻充电功率及系统最大充电功率;  $P_{\text{ess},t}^d$ 、 $P_{\text{ess},\text{max}}^d$  分别为当前时刻放电功率及系统最大放电功率;  $S_{\text{start}}$ 、 $S_{\text{end}}$  分别为一次充/放电开始和结束时刻荷电状态;  $S_t$ 、 $S_{t-\Delta t}$  及  $S_{\Delta t}$  分别表示当前时刻、上一时刻 BESS 荷电状态及  $\Delta t$  时间内系统消耗/吸收的功率通过转换得到的荷电状态;  $Q_{\text{min}}$  和  $Q_{\text{max}}$  分别为 BESS 最小、最大输出电量。

由于在实际使用过程中 BESS 无法达到理想化“满充满放”状态, 本文将计及系统在每一次充放电过程中所伴随的能量迁移, 主要考虑电池自身热损耗。

## 2 基于精英策略的遗传-蚁群算法

多目标模型求解过程烦琐, 目标函数之间相互影响制约难以寻求最优解, 当一个目标函数值改变后其他目标函数的最优解可能被破坏, 无法同时取得最优结果。在众多启发式算法中, GA 具有快速全局搜索能力, 在对优化目标进行处理时可采用拒绝、改进、惩罚等约束策略, 是求解约束非线性规划问题最常用的方法, 但构造

好的惩罚函数是求解问题的关键；ACO 通过信息素的累积和更新可以使目标函数收敛于最优解，具有较强的分布、并行、全局收敛能力，但在运行初期由于初始信息素较为匮乏，存在初始搜索速度慢、效率低的问题。

基于以上分析，本文提出 EP-GA 算法。首先，根据不可行点到可行域的距离来处理在不可行域的适值函数，并自适应地调整该不可行点的惩罚程度，用于对模型约束条件进行限制处理以实现更好的惩罚效果，并快速求出全局最优解函数进行有关问题的初始信息素分布。然后，考虑将遗传算法的全局寻优能力以及蚁群算法的寻优收敛能力结合起来，将 GA 求解出的结果转换为 ACO 中的信息素值，再利用基于精英策略的蚁群算法进行最终的求解计算，以得到优化问题的全局最优解。

基于现有 GA 算法内容，构造一个新的惩罚函数来处理在不可行域的适值函数。

$$e_{\text{val}}(x) = \begin{cases} f(x) & x \in D \\ \frac{f(x)}{(d(x,D)+1/F(x)+\alpha)^p} & f(x) \geq 0, x \notin D \\ f(x) \cdot (d(x,D)+1/F(x)+\alpha)^p & f(x) < 0, x \notin D \end{cases} \quad (10)$$

式中： $p$ 、 $\alpha$  为参数，满足  $p \geq 1$  且  $\alpha \geq 0$ 。通过该惩罚函数处理极大化问题，可以使得  $x$  在可行域内  $D$  时，等于目标函数值；在可行域之外时，按  $x$  距可行域距离  $d(x,D)$  及可行度  $F(x)$  的不同自适应的调节惩罚值，距可行域距离越大表示此时脱离可行域的程度越大， $d(x,D)/F(x)$  越大， $(d(x,D)+1/F(x)+\alpha)^p$  在  $p \geq 1$  时也越大，求得的  $e_{\text{val}}(x)$  值也就越大，即为了使该点重回可行域时的惩罚程度越强，以此达到动态自适应惩罚的目的。

信息素指引着蚁群的寻优方向，蚁群算法中的初始信息素值即为利用遗传算法的搜索结果，根据适应度值对个体进行排序<sup>[21]</sup>，并取前 10% 的个体作为可行解集合初始化蚁群算法参数，作为蚁群搜索起点。然后在蚂蚁的搜索过程中逐步对信息素量进行更新，蚂蚁每走完一条支路，更新的信息素量可以表示为

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t-1) + \Delta\tau_{ij}(t,t+n) + \Delta\tau_{ij}^*(t,t+n) \quad (11)$$

式中： $\rho$  为信息素挥发比例因子，通常设置  $\rho < 1$  以避免路径上信息素的无限累加； $\tau_{ij}$  为本次

迭代中蚂蚁信息素量； $\Delta\tau_{ij}(t,t+n)$  为本次搜索路径  $(i,j)$  上一般蚂蚁引起的信息素量增加，如式 (12) 所示， $\Delta\tau_{ij}^*(t,t+n)$  为精英蚂蚁引起的信息素量增加。

$$\Delta\tau_{ij}(t,t+n) = \begin{cases} Q \cdot f_{\text{best}}, & \text{蚂蚁经过}(i,j)\text{支路} \\ 0, & \text{蚂蚁未经过}(i,j)\text{支路} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $Q$  为常数； $f$  为个体适应度。

基于以上分析，采用改进遗传-蚁群的算法储能系统运行优化控制的算法步骤如图 5 所示。

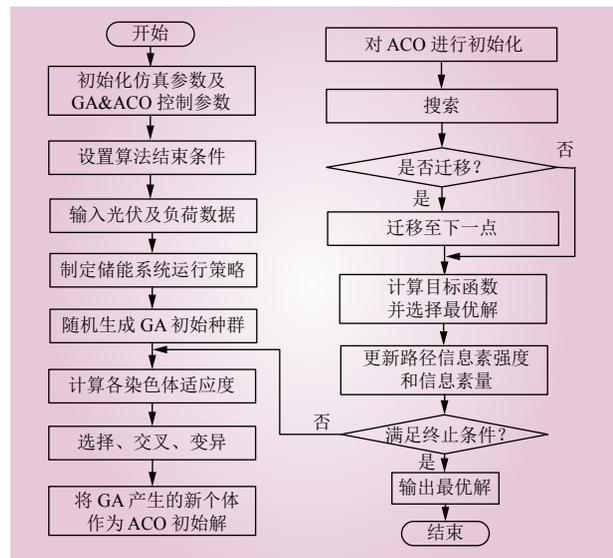


图 5 EP-GA 算法流程

Fig. 5 Genetic-ant colony algorithm process with penalty function based on elite strategy

### 3 仿真实例

#### 3.1 算例设置

以江苏省某区域电网数据为例进行光储电站 OCS 优化及投资收益仿真分析。应用该地区最新峰谷分时电价：220 kV 以上大工业峰、谷、平、尖峰时段电价分别为 0.994 7、0.298 9、0.596 8、1.094 7 元/(kW·h)，其中在 7、8 月实施季节性尖峰电价。设置调度周期为 24 h，数据采样时间间隔为 15 min。根据发改价格〔2019〕761 号文件有关指示，“自发自用、余量上网”模式下 PV 全发电量补贴标准为 0.10 元/(kW·h)。脱硫标杆上网电价按照 0.39 元/(kW·h) 计算。其他系统相关参数详见表 1。

根据上述经济模型参数设定，采用 EP-GA 进



表 1 “光伏+储能”系统相关参数  
Table 1 “Photovoltaic and energy storage” system cost parameters

参考类型	数值
光伏装机容量/kW	3 000
储能装机容量/(kW·h)	1 500
储能装机容量/kW	500
光伏组件及储能变流器寿命/年	20
$D_{OD}=100\%$ 条件下电池循环寿命/次	5 000
PV初始投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	3 730
储能电池单位容量成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	1 800
BESS变流器单位功率成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	600
BESS SOC上限/%	90
BESS SOC下限/%	10
光储系统年运维费率/%	3
贷款比例/%	70
贷款利率/%	4.9
贴现率/%	6
年运行天数/天	350

行模型优化求解。Matlab 程序中设定 GA 种群规模为 50，交叉、变异概率分别为 0.8、0.02，惩罚函数参数  $p=1.6$ ， $\alpha=0.1$ ；ACO 蚂蚁个数为 24，局部信息素挥发因子  $\rho=0.15$ ，最大迭代次数为 500。

### 3.2 计算结果分析

利用净现值法对本文所研究系统进行投资可行性分析，采用常规运行日两充两放策略的“光伏+储能”净现值流量如表 2 所示，本文策略下的净现金流量见表 3。通过对比 2 种方式下现金流入量、净现金流量折现值、累计净现值，以及表 4 所示的 2 种策略下的投资回报率及回收年限可以看出，以 20 年为例，本文策略下投资净收益为 119 328.1 万元，较两充两放策略高出 11.94%，且投资回笼期为 8.1 年，可提前 1.14 年收回全部投资成本。

这是由于本文策略可通过实时分析 PV 出力与负荷曲线，“人性化”地调整 OCS。由此可见，在现有储能市场环境下，对储能系统制定适当的运行控制策略是提高系统收益和加快投资人资金回收期的有效途径。

基于本文所提出的 OCS，可得四季典型负荷及 PV 出力下，系统向上级送电、购电曲线如

表 2 两充两放策略净现金流量  
Table 2 Net cash flow under constant power operation control strategy

					万元
年度	现金流入	现金流出	净现金流量	净现金流量折现值	累计净现值
0	0	163 944.4	-163 944.4	-163 944.400	-163 944.400
1	23 044.34	39.3	23 005.04	21 702.860	-142 241.500
2	23 044.34	39.3	23 005.04	20 474.400	-121 767.100
3	23 044.34	39.3	23 005.04	19 315.470	-102 451.600
4	23 044.34	39.3	23 005.04	18 222.140	-84 229.500
5	23 044.34	39.3	23 005.04	17 190.700	-67 038.800
6	23 044.34	39.3	23 005.04	16 217.640	-50 821.160
7	23 044.34	39.3	23 005.04	15 299.660	-35 521.50
8	23 044.34	39.3	23 005.04	14 433.640	-21 087.850
9	23 044.34	39.3	23 005.04	13 616.650	-7 471.207
10	23 044.34	39.3	23 005.04	12 845.890	5 374.686
11	23 044.34	39.3	23 005.04	12 118.770	17 493.450
12	23 044.34	39.3	23 005.04	11 432.800	28 926.250
13	23 044.34	39.3	23 005.04	10 785.660	39 711.910
14	23 044.34	39.3	23 005.04	10 175.150	49 887.060
15	23 044.34	39.3	23 005.04	9 599.198	59 486.260
16	23 044.34	39.3	23 005.04	9 055.847	68 542.100
17	23 044.34	39.3	23 005.04	8 543.252	77 085.360
18	23 044.34	39.3	23 005.04	8 059.672	85 145.030
19	23 044.34	39.3	23 005.04	7 603.464	92 748.490
20	23 044.34	39.3	23 005.04	7 173.079	99 921.570

图 6 所示。其中负值表示系统从上级购电；正值表示系统向上级送电。

若不考虑 PV 全发电量补贴，此时两充两放策略下净现金流量见表 5。可以看出，若未来几年财政补贴支持力度呈下降趋势，则回收期将会变长，严重者可能导致无法收回成本并取得效益。但若能够在运行阶段及时对 OCS 进行调整，则可以弥补该部分收益损失。

进一步研究电池剩余使用寿命 (RUL)、净收益及系统使用年限间关系，可以看出随使用年限的增加，电池剩余使用寿命逐渐下降，且年均收益和剩余使用寿命近似为成正比关系，如图 7 所示。因此在实际使用过程中，运行方应根据实际需要及相关数据估算选择恰当时机进行电池更换，以避免系统在容量过低时持续运行，进一步



表 3 本文策略下的净现金流量  
Table 3 Net cash flow under this strategy

年度	现金流入	现金流出	净现金流量	净现金流量折现值	累计净现值
0	0	163 944.4	-163 944.4	-163 944.4	-163 944.40
1	24 736.29	39.3	24 696.99	23 299.04	-14 0645.30
2	24 736.29	39.3	24 696.99	21 980.23	-11 8 665.10
3	24 736.29	39.3	24 696.99	20 736.07	-97 929.04
4	24 736.29	39.3	24 696.99	19 562.33	-78 366.72
5	24 736.29	39.3	24 696.99	18 455.03	-59 911.69
6	24 736.29	39.3	24 696.99	17 410.40	-42 501.29
7	24 736.29	39.3	24 696.99	16 424.91	-26 076.38
8	24 736.29	39.3	24 696.99	15 495.20	-10 581.19
9	24 736.29	39.3	24 696.99	14 618.11	4 036.92
10	24 736.29	39.3	24 696.99	13 790.67	17 827.59
11	24 736.29	39.3	24 696.99	13 010.06	30 837.66
12	24 736.29	39.3	24 696.99	12 273.65	43 111.30
13	24 736.29	39.3	24 696.99	11 578.91	54 690.21
14	24 736.29	39.3	24 696.99	10 923.50	65 613.72
15	24 736.29	39.3	24 696.99	10 305.19	75 918.91
16	24 736.29	39.3	24 696.99	9 721.877	85 640.78
17	24 736.29	39.3	24 696.99	9 171.582	94 812.37
18	24 736.29	39.3	24 696.99	8 652.436	103 464.80
19	24 736.29	39.3	24 696.99	8 162.676	111 627.50
20	24 736.29	39.3	24 696.99	7 700.637	119 328.10

表 4 不同控制策略对经济性的影响  
Table 4 The impact of different control strategies on economy

策略	净收益/万元	投资回收年限/年	投资回报率/%
两充两放控制策略	99 921.57	9.3	8.03
本文策略	119 328.10	8.1	9.21

导致经济效益变差。

利用本文算法与传统 GA 算法对系统规划模型进行求解分析，平均适应度与迭代次数曲线见图 8，计算结果见表 6。

可以看到相比于遗传算法，本文提出的方法更具有全局搜索能力、全局收敛能力以及快速性，不仅避免了传统遗传寻优过程易陷入局部极小的情况，同时改进后的新算法迭代次数少于传统遗传，能够更加高效精确地寻求模型最优解，且更适宜“光伏+储能”电站这种需要多目标共

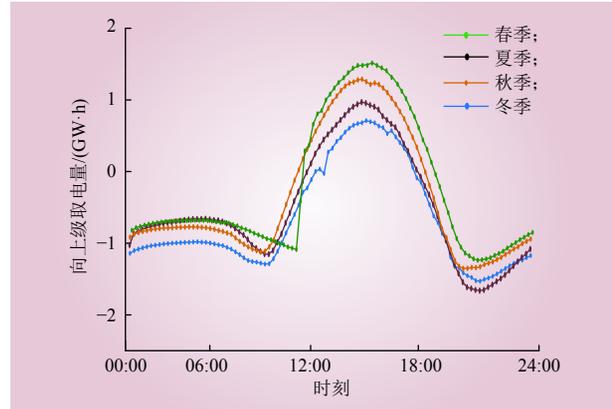


图 6 系统向上级送/取电电量

Fig. 6 The system sends/takes power to the superior

表 5 无光伏并网补贴情况下净现金流量  
Table 5 Net cash flow without PV grid-connected subsidies

年度	现金流入	现金流出	净现金流量	净现金流量折现值	累计净现值
0	0	163 944.4	-163 944.4	-163 944.4	-163 944.40
1	20 687.17	39.3	20 647.87	19 479.12	-144 465.30
2	20 687.17	39.3	20 647.87	18 376.53	-126 088.70
3	20 687.17	39.3	20 647.87	17 336.35	-108 752.40
4	20 687.17	39.3	20 647.87	16 355.05	-92 397.33
5	20 687.17	39.3	20 647.87	15 429.29	-76 968.04
6	20 687.17	39.3	20 647.87	14 555.93	-62 412.11
7	20 687.17	39.3	20 647.87	13 732.01	-48 680.10
8	20 687.17	39.3	20 647.87	12 954.73	-35 725.37
9	20 687.17	39.3	20 647.87	12 221.44	-23 503.93
10	20 687.17	39.3	20 647.87	11 529.66	-11 974.26
11	20 687.17	39.3	20 647.87	10 877.04	-1 097.22
12	20 687.17	39.3	20 647.87	10 261.36	9 164.14
13	20 687.17	39.3	20 647.87	9 680.527	18 844.66
14	20 687.17	39.3	20 647.87	9 132.573	27 977.24
15	20 687.17	39.3	20 647.87	8 615.635	36 592.87
16	20 687.17	39.3	20 647.87	8 127.957	44 720.83
17	20 687.17	39.3	20 647.87	7 667.884	52 388.71
18	20 687.17	39.3	20 647.87	7 233.853	59 622.57
19	20 687.17	39.3	20 647.87	6 824.39	66 446.96
20	20 687.17	39.3	20 647.87	6 438.104	72 885.06

同优化的应用场景。所提算法在对本文算例模型进行优化后，较传统遗传算法规划得到的净收益提高了 6%。

表 6 算法结果比较  
Table 6 Algorithm result comparison

算法	储能功率/ kW	光伏功率/ kW	储能容量/ (kW·h)	净收益/ 万元
EP-GA算法	500	360	1 800	119 328.1
GA算法	517	372	1 860	112 509.7

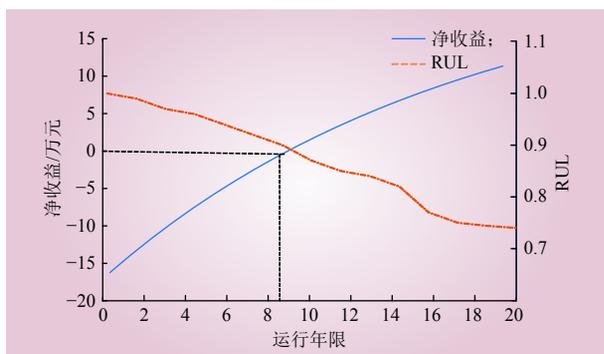


图 7 净收益与电池剩余使用寿命关系

Fig. 7 The relationship between net income and remaining useful life

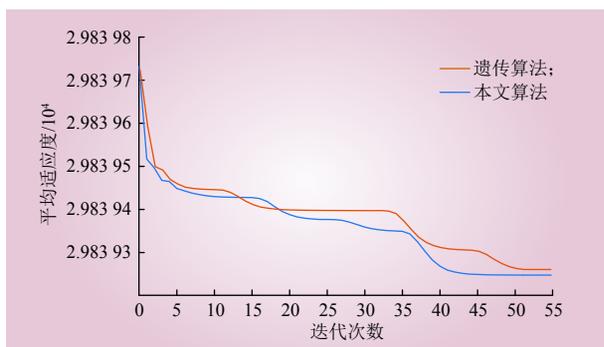


图 8 收敛曲线

Fig. 8 Convergence curve

## 4 结语

储能系统运行控制策略的选择及其求解方式直接影响系统经济型，本文针对“光伏+储能”以净收益最大、向大电网取电量最少为目标，在考虑度电成本与电池寿命衰减的基础上建立了储能充放控制与投资收益分析模型，并采用基于精英策略的带有惩罚函数的遗传-蚁群算法进行模型求解。

(1) 本文所提出的方法可较好地指导储能优化控制策略的选择，有效提高运行阶段经济效益，相比于目前实际工程中应用的两充两放控制

策略下，在本文优化策略下算例净收益为优化前的 119.42% (未含税)，投资回报率增加 1.08%，可提前 1.14 年收回全部投资成本。

(2) 相比于传统遗传算法，本文提出的改进算法不仅避免了传统遗传寻优过程易陷入局部极小的情况，同时改进后其迭代次数少于遗传算法，能够更高效的寻求目标最优解。所提算法在对本文算例模型进行优化后，较传统遗传算法规划得到的净收益提高了 6%。

## 参考文献:

- [1] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(9): 232-237.  
CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, *et al.* Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237.
- [2] 刘国静, 吕风波, 赵宏大, 等. 基于  $N-1$  准则的变电站储能容量优化配置模型及方法 [J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(12): 54-59.  
LIU Guojing, LÜ Fengbo, ZHAO Hongda, *et al.* An optimal allocation model and method of energy storage capacity in substations based on  $N-1$  criterion[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(12): 54-59.
- [3] 赵书强, 刘大正, 谢宇琪, 等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 30-36, 53.  
ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, *et al.* Scheduling strategy of energy storage in Wind-solar-battery hybrid power system based on dependent-chance goal programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 30-36, 53.
- [4] 牛文迪. 电池储能参与电网削峰填谷优化策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
NIU Wendi. Load shift optimization strategy of battery energy storage system in power grid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [5] 孟娅, 李欣然, 黎淑娟, 等. 电池储能参与配电网削峰填谷的变功率控制策略 [J]. 电力建设, 2018, 39(4): 45-50.  
MENG Ya, LI Xinran, LI Shujuan, *et al.* Variable power control strategy of battery energy storage system participating in distribution network peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 45-50.

- [6] 张宇宁,王海云,刘树伟.多代理粒子群算法光储电站控制策略[J].四川电力技术,2020,43(5):27-31,94.  
ZHANG Yuning, WANG Haiyun, LIU Shuwei. Multi-agent particle swarm optimization control strategy for optical storage power station[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2020, 43(5): 27-31,94.
- [7] 李建林,牛萌,周喜超,等.能源互联网中微能源系统储能容量规划及投资效益分析[J].电工技术学报,2020,35(4):874-884.  
LI Jianlin, NIU Meng, ZHOU Xichao, *et al.* Energy storage capacity planning and investment benefit analysis of micro-energy system in energy interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 874-884.
- [8] 韩晓娟,王丽娜,高僮,等.基于成本和效益分析的并网光储微网系统电源规划[J].电工技术学报,2016,31(14):31-39,66.  
HAN Xiaojuan, WANG Lina, GAO Tong, *et al.* Generation planning of grid-connected micro-grid system with PV and batteries storage system based on cost and benefit analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 31-39,66.
- [9] 潘福荣,张建赞,周子旺,等.用户侧电池储能系统的成本效益及投资风险分析[J].浙江电力,2019,38(5):43-49.  
PAN Furong, ZHANG Jianyan, ZHOU Ziwan, *et al.* Cost-benefit and investment risk analysis of user-side battery energy storage system[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5): 43-49.
- [10] 杨晓萍,刘浩杰,黄强.考虑分时电价的风光储联合“削峰”优化调度模型[J].太阳能学报,2018,39(6):1752-1760.  
YANG Xiaoping, LIU Haojie, HUANG Qiang. Optimal dispatching model of wind-sunlight-storage combining with “peak shaving” considering time-of-use electricity price[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(6): 1752-1760.
- [11] 贺继锋,杜治,黄家祺,等.考虑储能站投资收益的配电网规划模型[J].电力建设,2017,38(6):92-99.  
HE Jifeng, DU Zhi, HUANG Jiaqi, *et al.* Distribution network planning model considering income from investment of energy storage station[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(6): 92-99.
- [12] 韩晓娟,田春光,张浩,等.用于削峰填谷的电池储能系统经济价值评估方法[J].太阳能学报,2014,35(9):1634-1638.  
HAN Xiaojuan, TIAN Chunguang, ZHANG Hao, *et al.* Economic evaluation method of battery energy storage system in peak load shifting[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1634-1638.
- [13] 季宇,熊雄,寇凌峰,等.基于经济运行模型的储能系统投资效益分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(4):143-150.  
JI Yu, XIONG Xiong, KOU Lingfeng, *et al.* Analysis of energy storage system investment benefit based on economic operation model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 143-150.
- [14] 孟凡斌,周静,张霄,等.基于改进FPA-LHS算法的并网型微电网容量优化配置研究[J].智慧电力,2021,49(10):45-51.  
MENG Fanbin, ZHOU Jing, ZHANG Xiao, *et al.* Optimal capacity configuration of grid-connected microgrid based on improved FPA-LHS algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 45-51.
- [15] 杨祺铭,季陈林,刘友波,等.多条公交线路的光储充电站日内滚动优化策略[J].智慧电力,2020,48(8):44-50,90.  
YANG Qiming, JI Chenlin, LIU Youbo, *et al.* Day-rolling optimization strategy for photovoltaic-energy storage charging station with multiple electric bus lines[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 44-50, 90.
- [16] 俞秦博.分布式储能在电网中的接入与典型运行方案研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.  
YU Qinbo. Research on access and typical operation scheme of distributed energy storage in power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [17] 何颖源,陈永翀,刘勇,等.储能的度电成本和里程成本分析[J].电工电能新技术,2019,38(9):1-10.  
HE Yingyuan, CHEN Yongchong, LIU Yong, *et al.* Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 1-10.
- [18] 李建林,靳文涛,徐少华,等.用户侧分布式储能系统接入方式及控制策略分析[J].储能科学与技术,2018,7(1):80-89.  
LI Jianlin, JIN Wentao, XU Shaohua, *et al.* Analysis of access mode and control strategy of distributed energy storage system on user side[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(1): 80-89.
- [19] 李相俊,马锐,王上行,等.考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J].高电压技术,2020,46(1):62-70.  
LI Xiangjun, MA Rui, WANG Shangxing, *et al.* Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 62-70.
- [20] 金顺平,房方,朱仲晏,等.不同投资模式下计及缺电率约束的微网容量配置博弈分析[J].中国电力,2020,53(8):173-181.  
JIN Shunping, FANG Fang, ZHU Zhongyan, *et al.* Game analysis of microgrid capacity configuration for different investment modes constrained by loss of power supply probability[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 173-181.
- [21] 倪金林.实数编码下的混合算子遗传算法在非线性问题的应用



[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

NI Jinlin. Application of real code and combined operators genetic algorithm to nonlinear problem[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.

#### 作者简介:

曹雅琦 (1996—), 女, 硕士, 从事储能电池研究, E-mail: 1197869028@qq.com;

赵波 (1977—), 男, 博士, 高级工程师 (研究员

级), 从事电力电子技术在电力系统中的应用研究, E-mail: 13910889512@126.com;

王丽婕 (1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 从事新能源功率预测、机器学习、系统优化等研究, E-mail: wanglijie\_0203@126.com;

李相俊 (1979—), 男, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事大规模储能技术、新能源与分布式发电等研究, E-mail: Li\_xiangjun@126.com。

(责任编辑 蒋东方)

## Research on Operational Benefit Improvement Strategy of Optical Storage Power Station Based on Genetic Ant Colony Algorithm

CAO Yaqi<sup>1</sup>, ZHAO Bo<sup>1</sup>, WANG Lijie<sup>1</sup>, LI Xiangjun<sup>2</sup>, GAO Binheng<sup>3</sup>

(1. Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This article takes the grid-connected optical storage regional power grid as the research object, and starts the research with the full use of the flexible regulation role of the energy storage system and the improvement of the system operation economy. On the basis of considering the cost of electricity, a control strategy for real-time adjustment of the BESS operating state is proposed, and an optimization model is established with the goal of maximizing net income, minimizing total cost, and extracting electricity from the large grid. The genetic-ant colony algorithm of the penalty function solves the optimization model, and analyzes the investment income of the grid-connected optical storage system from the perspective of investors. Finally, through the simulation analysis of actual data in a certain area of Jiangsu, the optimization control strategy of "photovoltaic and energy storage" in this area and the results of economic benefit analysis are given to verify the feasibility of this model and algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (Research on Short-Term Generation Power Prediction of Grid-connected Wind Farms Based on Numerical Weather Prediction Information Fusion, No.51607009), Open Fund of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (Research on Equivalent Model and Characteristic Parameter Identification Technology of Large Capacity Energy Storage Power Station, No. DGB51201901183) and Young Talent Cultivation Plan of High-Level Teachers Construction of Beijing Municipal Institutions (No.CIT&TCD201804053).

**Keywords:** photovoltaic and energy storage; energy storage real-time optimization control strategy; operational economic benefits; net present value; investment recovery period