

## 考虑光伏校正的微电网储能容量优化配置

陈景文<sup>1</sup>, 肖妍<sup>1</sup>, 莫瑞瑞<sup>1</sup>, 田媛<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710021;  
2. 国网陕西省电力公司神木市供电分公司, 陕西 榆林 719300)

**摘要:** 针对光伏微电网中储能容量优化配置时忽略光伏实际出力的问题, 提出一种考虑温度和光照强度的光伏输出功率校正方法, 建立光伏优化模型。其次以储能经济最优为目标, 在满足负荷需求的基础上进行光储联合建模, 并考虑负荷缺电率和能量溢出比的影响, 对电网分时电价下5种储能电池分别进行容量配置和经济性分析。最后通过算例验证了所提模型更满足地域特性、符合光伏实际输出功率。所配置的结果表明, 在项目周期内钠硫电池成本最高, 功率型铅酸电池成本最低, 全钒液流、锂电池和能量型铅酸电池总投资成本相当。

**关键词:** 微电网; 光伏校正; 电网分时电价; 储能; 容量优化

### Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction

CHEN Jingwen<sup>1</sup>, XIAO Yan<sup>1</sup>, MO Ruirui<sup>1</sup>, TIAN Yuan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;  
2. Shenmu City Power Supply Branch of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Yulin 719300, China)

**Abstract:** There is a problem that the actual photovoltaic output is ignored in the optimal allocation of energy storage capacity in a photovoltaic micro-grid. To solve this, a photovoltaic output power correction method considering temperature and light intensity is proposed, and a photovoltaic optimization model is established. Secondly, taking the economic optimal energy storage as the target, and taking account of the need to meet the load demand, optical storage joint modeling is carried out. Considering the influence of load power shortage rate and energy spillover ratio, capacity allocation and economic analysis are conducted for five energy storage batteries under the time-of-use electricity pricing of the grid. Finally, an example is given to verify that the proposed model is more suitable for the regional characteristics and conforms to the actual photovoltaic output power. The configured energy storage results show that NAS costs are highest during the project cycle, VRLA-cap costs are lowest, and the total investment costs of V-redox, LPF, and VRLA-B are similar.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61871259) and the Project of Xi'an Science and Technology Bureau (No. 2020KJRC003).

**Key words:** micro-grid; photovoltaic correction; time-of-use electricity price of grid; energy storage; capacity optimization

## 0 引言

微电网作为新能源有效利用手段, 得到了广泛的应用, 但同时也存在电能质量、可再生能源的利用率等问题<sup>[1-4]</sup>。储能的出现不仅可以维持微电网的稳定性, 改善电能质量, 还能加大可再生能源的利用, 提高系统的经济性, 特别是“光伏+储能”已经成为一个经济上可行的方案<sup>[5-7]</sup>。而储能的有效选

用和配置直接决定了系统的投资、运行成本以及各类电气指标的实现, 因此, 储能容量的合理配置具有现实意义。

目前对储能配置的研究主要以储能的经济效益和平抑波动为目标。文献[8-12]应用新能源出力规划和配电网优化运行来配置储能容量, 以达到在全生命周期下的储能经济最优; 文献[13]设计了规划运行一体化配置方法, 将系统效益考虑在内, 重新确立储能的全生命周期模型, 以此来配置储能容量; 文献[14-15]考虑光储联合配置, 以储能的荷电状态作为约束, 对3种储能电池进行对比分析得出经济

结果；文献[16]提出了集中储能和分布式储能的结构，并进一步分析了两种储能结构下的储能配置容量范围；文献[17-18]以新能源发电出力波动最小为目标，建立目标函数，求取储能的最小容量；文献[19]以直流母线波动最小，混合储能容量配比最优为目标进行容量配置；文献[20-23]考虑储能平抑新能源功率的影响，建立有功功率波动最小的目标函数，求取在有功功率最小波动下的储能容量最优概率分布。

以上容量配置，部分利用统计学以及系统规划运行方案来给新能源发电系统配置储能容量，大多将光伏和储能以额定容量计算，并在宏观上给出储能配置的优化范围，而更多研究是对特定负荷下的储能容量配置，将负荷用电需求作为配置标准计算出所需储能容量值。往往忽略光伏的实际出力情况，并不能将光伏和负荷需求有效结合，导致以此建立的模型并不能真实反映实际情况。

本文在考虑储能经济性的同时，将光伏和储能作为联合配置整体，以此来满足特定负荷的需求，可以有效解决“光+储+荷”的供需平衡。对光伏按特定地域的实际发电功率进行校正，配置更符合实际需求的光伏装机容量，有效避免按理论出力配置后出现的光伏弃光或功率不足的现象，并通过算例验证所建立的光伏优化模型的有效性，给出考虑电网分时电价下5种典型储能电池的容量配置结果和经济性特点。

## 1 考虑光伏校正的光伏电池优化模型

图1为并网型光储直流微电网的系统结构，主要包括光伏发电系统、储能系统、本地负载和大电网四个部分，其中光伏电池是光伏发电系统中最基本的电能产生单元，其结构在忽略各种内部损耗情况下，可由光生电流源和一个二极管并联得到。

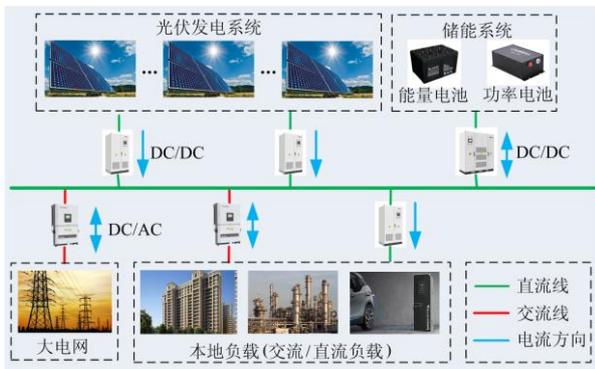


图1 光储微网系统结构

Fig. 1 Structure of optical storage microgrid system

其简单二极管模型的伏安关系如式(1)所示。

$$I = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right] - (V + IR_s) / R_{sh} \quad (1)$$

当  $I = 0$  时，可得开路电压  $U$  的关系式如式(2)所示。

$$U = (AKT/q) \ln \left[ \left( I_{ph} + I_s \right) / I_s - V / (I_{ph} I_s) \right] \quad (2)$$

光伏输出功率满足式(3)，即

$$P_V = VI = V_{MPPT} I_{MPPT} \quad (3)$$

式中： $I = SE$ ， $I_{ph} \geq I_s$ ， $R_s \ll R_{sh}$ ， $V$  为光伏电池输出电压； $I$  为光伏电池输出电流； $I_{ph}$  为光伏电流源电流； $I_s$  为二极管饱和电流； $q$  为电子电量常量，为  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ； $K$  为玻尔兹曼常量，为  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； $T$  为光伏电池工作热力学温度值； $A$  为二极管特性拟合系数为定值； $S$  为光照强度； $E$  为光电转换系数； $R_s$  和  $R_{sh}$  分别为模拟光伏电池内部损耗的串并联电阻<sup>[24]</sup>。

在光伏研究中，学者大多将光辐照度按  $1000 \text{ W/m}^2$  和温度  $25^\circ\text{C}$  作为标准，忽略实际使用中光辐照度和温度对光伏发电系统的影响。光伏电池的短路电流随着温度的升高基本保持不变，但开路电压却不断降低，在光辐照度恒定的条件下，温度越高，最大功率反而越小；而光辐照度的提高对于短路电流、开路电压和最大功率都是增大作用，但最大功率点电压变化较小。因此为精确模型的准确性，保证后续储能容量配置的可靠性和经济性，需要对光伏系统输出功率进行一定修正。

由于光伏输出功率与温度和光照度有关，在对光伏输出功率进行建模时需要综合考虑两者的影响。其中光照度表达式如式(4)所示。

$$S = S_b + S_d \quad (4)$$

式中： $S_b$  为光辐直接辐射量； $S_d$  为光辐散射辐射量。

$$S_{d1} = ((1-K)(1+\cos\beta) \times S_d) / 2 \quad (5)$$

$$S_{b1} = (S_b \times (\sin(h+\beta))) / \sin h \quad (6)$$

式中： $S_{d1}$  为  $S_d$  最终转换到相对水平面倾斜角为  $\beta$  的光伏电池板上的直射成分<sup>[25]</sup>； $S_{b1}$  为转换到相对水平面倾斜角为  $\beta$  的光伏电池板上的直射成分； $h$  为太阳高度角。

$$\sin h = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (7)$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin(2\pi \times (284 + n_i) / 365) \quad (8)$$

$$\omega = 15^\circ \times t \quad (9)$$

式中： $\varphi$  为观测点地理纬度； $\delta$  为当天观测时刻太阳赤纬角； $\omega$  为太阳时角； $n_i$  为日期序号， $n = 1, \dots, 365$ ； $t$  为从正午时刻算起的时刻序号，间隔为  $1 \text{ h}$ ，如正午  $12$  点， $t = 0$ ， $\omega = 0^\circ$ 。

新的光照度公式为

$$S_r = S_{b1} + S_{d1} = \left( (1-K)(1 + \cos \beta) \times S_d \right) / 2 + \left( S_{\max} \times (\sin(h + \beta)) \right) / \sin h \quad (10)$$

则校正后的光伏输出功率  $P_{V_r}$  如式(11)所示。

$$P_{V_r} = (S_r / S_{\text{ref}}) [1 + \gamma(T - T_{\text{ref}})] P_{V_{\text{ref}}} \quad (11)$$

式中:  $S_r$  是实际光辐照度;  $S_{\text{ref}}$  是标准条件下光辐照度, 取值  $1\,000\text{ W/m}^2$ ;  $T_{\text{ref}}$  为标准条件温度, 取值  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\gamma$  为组件最大功率温度系数, 取值  $-0.43\%$ ;  $P_{V_{\text{ref}}}$  为标准条件下的光伏输出功率。

根据上述模型, 可以获得光伏电池实际的输出功率, 为后续光储一体建模和容量的配置提供基础, 增强容量配置和系统的可靠性。

## 2 光储一体化经济模型

在满足负荷供电需求的情况下, 同时优化光伏发电并实现能量的最大化利用, 使储能所配置容量最小, 综合光伏和负荷出力对储能进行配置, 同时考虑光伏实际输出功率的影响。则系统在运行过程中应满足

$$P_V = P_B + P_L + P_G \quad (12)$$

式中:  $P_V$  为理想状态下光伏发电功率;  $P_B$  为电池功率;  $P_L$  为负载消耗功率;  $P_G$  为电网功率。

从上节光伏模型的建立中可知光伏发电功率和地理纬度及光伏板倾斜角度有关由此对所建立的模型进行优化。为保证光伏最大化利用,  $P_G$  为 0, 同时考虑逆变器效率  $\eta_1$ , 则系统  $t$  时刻的不平衡功率  $\Delta P_r$  应满足式(13), 即

$$\Delta P_r(t) = P_{V_r}(t) - P_L(t) / \eta_1 \quad (13)$$

则储能的  $t$  时刻所要吸收  $P_{Bc_r}$  或释放  $P_{Bf_r}$  的功率为

$$\begin{cases} P_{Bc_r} = \Delta P_r(t) \eta_2 \Delta t & \Delta P > 0 \\ P_{Bf_r} = \Delta P_r(t) / \eta_2 \Delta t & \Delta P < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{B_r} = \max \left\{ \left| \max P_{Bc_r} \right|, \left| \min P_{Bf_r} \right| \right\} \quad (15)$$

式中:  $P_{B_r}$  为考虑光反应校正系统运行期内储能所释放或补偿的最大功率。

当考虑充放电效率  $\eta_c$ 、 $\eta_f$  时, 储能所存储  $E_{Bc_r}$  或释放  $E_{Bf_r}$  的电量为

$$\begin{cases} E_{Bc_r} = P_{V_r}(t) - P_L(t) \eta_2 \eta_c \Delta t / \eta_1 & \Delta P > 0 \\ E_{Bf_r} = \frac{P_L(t)}{\eta_1} - P_{V_r}(t) \Delta t / (\eta_2 \eta_f) & \Delta P < 0 \end{cases} \quad (16)$$

则储能工作期间所存储的电量  $E_{B_r}$  应满足式(17), 即

$$E_{B_r} = \max \{ E_{Bc_r}, E_{Bf_r} \} \quad (17)$$

同时为使系统经济最优, 考虑储能投资成本最小, 包括安装成本  $C_i$ 、置换成本  $C_p$ 、维护成本  $C_m$  和回收价值  $C_r$ 。

$$C_i = \left( C_E \frac{t}{\eta} + C_D + C_B \times t \right) \frac{\alpha(1+\alpha)^r}{(1+\alpha)^r - 1} \quad (18)$$

$$C_p = C_E \frac{t}{\eta} \sum_{\lambda=1}^{\mu} \frac{(1-\gamma\xi)^{\lambda n}}{(1+\alpha)^{\lambda n}} \cdot \frac{\alpha(1+\alpha)^r}{(1+\alpha)^r - 1} \quad (19)$$

$$C_m = C_F P_B \quad (20)$$

$$C_r = \frac{\zeta C_i}{P_B} \sum_{\lambda=1}^{\mu} \frac{1}{(1+\alpha)^{\lambda n}} \cdot \frac{\alpha(1+\alpha)^r}{(1+\alpha)^r - 1} \quad (21)$$

则储能电池在整个项目周期内的年均成本模型为

$$C_s = C_i + C_p + C_m - C_r \quad (22)$$

式中:  $C_E$  为电池价格;  $t$  为电池每天放电时间;  $C_D$  为DC-DC转换装置价格;  $C_B$  为辅助装置的价格;  $C_F$  为电池年运行维护成本;  $\alpha$  为贴现率,  $\tau$  为项目周期;  $\zeta$  为电池成本下降比例;  $\lambda$  为电池单体更换次数;  $n$  为电池储能寿命周期。

## 3 光储一体化配置流程

为保证系统在运行期间能量最大化利用, 储能容量最小, 应使运行期内储能存储的电量等于释放的电量, 同时引入负荷缺电率  $\delta_{LPSP}$  和能量溢出比  $\delta_{EXC}$ , 并使其满足工程要求  $0 < \delta_{LPSP} < 0.02$ ,  $0.05 < \delta_{EXC} < 0.3$ , 增强系统的可靠性。

$$\sum_{t=t_0}^{t_0+nT} E_{Bc_r} - \sum_{t=t_0}^{t_0+nT} E_{Bf_r} = 0 \quad (23)$$

在系统运行期内, 考虑光伏校正, 负荷缺电量  $E_{LPS_r}$ 、光伏溢出量  $E_{EX_r}$ 、 $\delta_{LPSP}$  和  $\delta_{EXC}$  为

$$E_{LPS_r} = \sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} (P_L(t) - P_{V_r}(t) \eta_1 - P_{B_r} \eta_1 \eta_2 \eta_f) \Delta t \quad (24)$$

$$E_{EX_r} = \sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} \left( P_{V_r}(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_1} - \frac{P_{V_r}(t)}{\eta_2 \eta_c} \right) \Delta t \quad (25)$$

$$\delta_{LPSP} = E_{LPS_r} / \left( \sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} P_L(t) \Delta t \right) \quad (26)$$

$$\delta_{\text{EXC}} = E_{\text{EX},r} / \left( \sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} P_{V,r}(t)\Delta t \right) \quad (27)$$

由于储能电池寿命会因过充过放的影响而降低，因此需要对其充放电功率进行限制， $t$ 时刻储能电池的荷电状态为

$$\text{SOC}(t) = \begin{cases} \text{SOC}(t-1) + P_{\text{Bc},r}\eta_c\Delta t / E_{\text{B},r} \\ \text{SOC}(t-1) - P_{\text{Bf},r}\Delta t / E_{\text{B},r}\eta_f \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \\ 0 \leq P_{\text{Bc},r} \leq P_{\text{Bcmax}} \\ 0 \leq P_{\text{Bf},r} \leq P_{\text{Bfmax}} \end{cases} \quad (29)$$

式中： $\text{SOC}_{\min}$  和  $\text{SOC}_{\max}$  为电池荷电状态的下限和上限； $P_{\text{Bcmax}}$ 、 $P_{\text{Bfmax}}$  为储能充放电功率上限。

综上所述，光储一体化配置流程如图 2 所示，依据负荷状况和电网处理对光伏和储能进行协调配置。在已知负荷需求和电网电价区间，给定光伏出力 and 储能电池容量范围的情况下，按照一定的步长  $L_1$  和  $L_2$  增加光伏功率和储能电池容量，通过判断荷电状态对储能充放电量进行计算，进一步计算  $\delta_{\text{LPSP}}$  和  $\delta_{\text{EXC}}$ ，最终获得计及光伏校正时不同光伏功率和储能电池容量下的  $\delta_{\text{LPSP}}$  和  $\delta_{\text{EXC}}$ ， $E_{\text{B}}(m)$  和  $P_{\text{V}}(k)$  分别为第  $m$  和第  $k$  次循环所对应的储能容量和光伏功率； $E_{\text{Bmax}}$  和  $P_{\text{Vmax}}$  分别为储能和光伏上限。

#### 4 算例分析

为验证光伏优化的合理性，现利用本光伏优化方法和福建龙岩某光伏电站的测试数据进行对比，图 3 为光辐照度优化曲线和实际曲线对比图，图 4 为光伏输出优化曲线和实际曲线对比图，主要参数见图中标示。

由图 3、图 4 曲线对比可得，光辐照度和光伏输出功率的优化校正模型基本符合实际光伏发电曲线，此优化校正模型可满足光伏容量配置的校正。

以福建龙岩某一商场的用电量为基准进行光储配置，如图 5 所示，为使所配置的容量满足全年各类负荷的需求，选取最大负荷曲线进行光储配置，光伏最大出力曲线用典型曲线代替，电网的低谷电价在 00:00—08:00。

在光储一体化配置时，变流器的效率  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为 0.97，时间循环步长为 1 h，光伏循环步长为 1 kW，储能循环步长为 5 kW，电池初始 SOC 为 0.4，考虑分时电价，根据储能配置流程进行配置，图 6 为考虑电网分时电价下光伏容量对  $\delta_{\text{LPSP}}$  和  $\delta_{\text{EXC}}$  的影响。

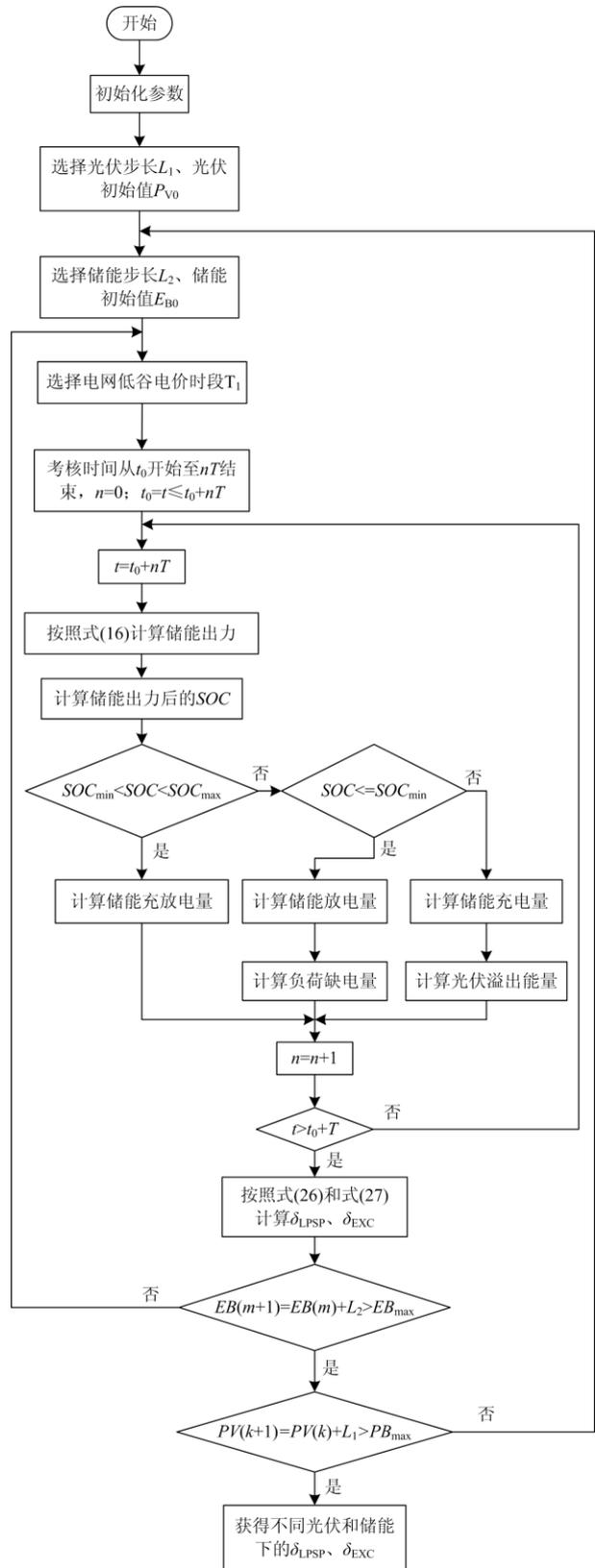
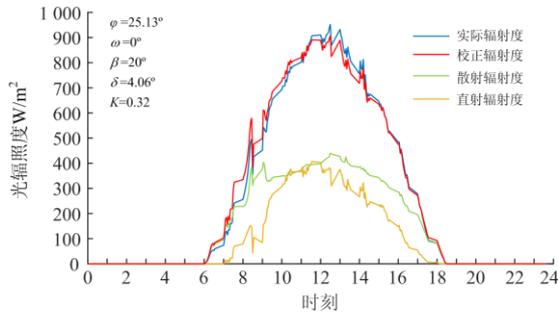
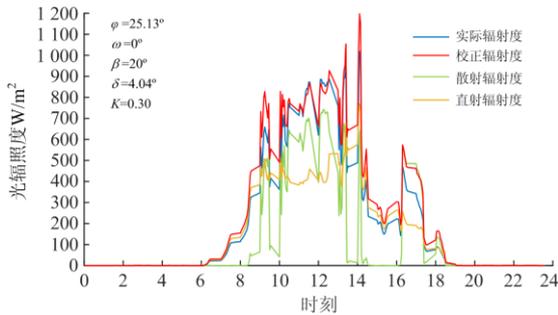


图 2 光储一体化配置流程图

Fig. 2 Flow chart of optical storage integration configuration



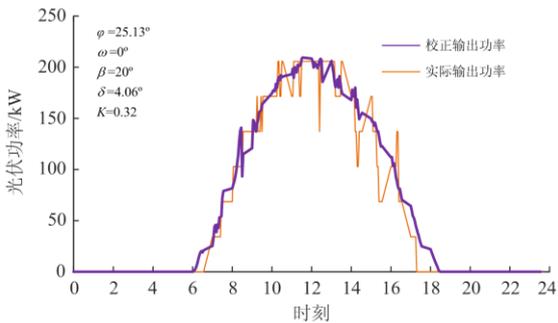
(a) 晴天辐射度优化



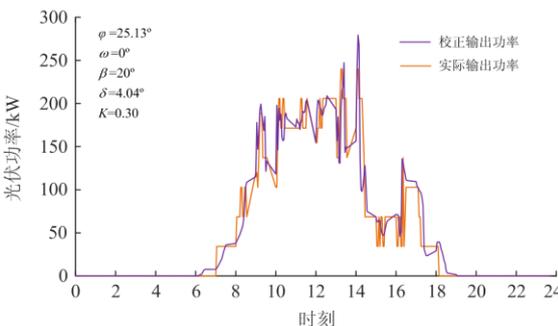
(b) 晴转阴辐射度优化

图3 光辐照度优化曲线和实际曲线对比

Fig. 3 Contrast of the optimal curve of light irradiance with the actual curve



(a) 晴天光伏输出优化



(b) 晴转阴光伏输出优化

图4 光伏输出优化曲线和实际曲线对比

Fig. 4 Comparison of PV output optimization curve and actual curve

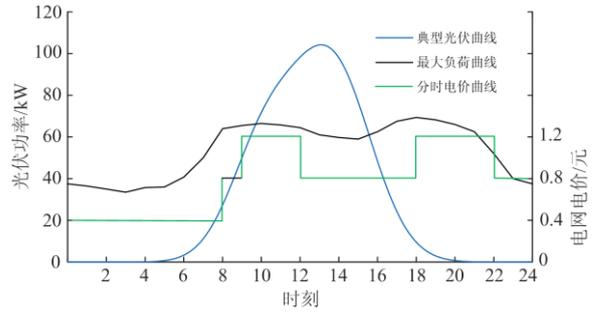


图5 考虑电网分时电价下的典型曲线

Fig. 5 Typical curve considering time share price of power grid

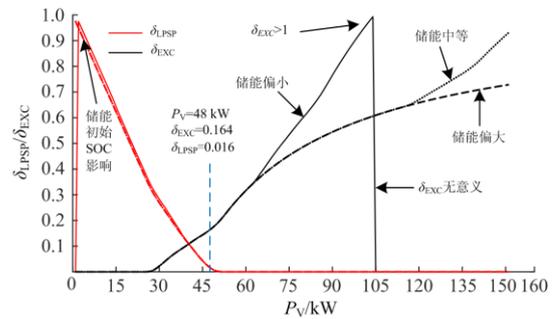


图6 考虑电网分时电价下光伏容量对  $\delta_{LPSP}$ 、 $\delta_{EXC}$  的影响

Fig. 6 Influence of photovoltaic capacity on  $\delta_{LPSP}$  and  $\delta_{EXC}$  considering the time-sharing price of power grid

由图6可知, 当光伏容量较小时, 储能容量的大小不会改变  $\delta_{EXC}$  的值, 只有当光伏容量达到一定规模,  $\delta_{EXC}$  将会逐渐增大, 并且其值的大小会受储能容量的增大而减小;  $\delta_{LPSP}$  的值与  $\delta_{EXC}$  的值相反, 由于光储系统长时间运行中储能容量只受光伏和电网的影响, 当不考虑电网对其充电时, 储能系统只作为光伏能量的中转装置, 所以  $\delta_{LPSP}$  值的大小受储能容量大小的影响基本相同, 并且其值随着光伏容量的增加而减小。由此在满足工程约束条件内, 确定  $\delta_{LPSP}=0.016$  和  $\delta_{EXC}=0.16$  时, 光伏每小时最小容量取值为 48 kW, 光伏理论装机容量为 171 kW。

图7为考虑电网分时电价下光伏装机容量都为 171 kW 时, 分别对目前较典型的铅酸能量密度电池(VRLA-B)、铅酸功率密度电池(VRLA-CAP)、铁锂电池(LFP)、全钒液流电池(V-redox)以及钠硫电池(NaS)5种储能电池按照光储配置流程进行配置, 具体参数如表1所示<sup>[26-27]</sup>。

由图7可知, 在光伏理论装机容量为 171 kW, 储能容量的增大会使  $\delta_{LPSP}$  和  $\delta_{EXC}$  的值减小, 当储能容量增大到一定值时,  $\delta_{LPSP}$  和  $\delta_{EXC}$  的值将保持不变, 且不同储能介质所配置的容量有所差异。通

过上述描述即可确定光伏和储能的容量，但此时还未考虑光伏校正，为精确配置结果，引入光伏优化模型，校正曲线同样选取龙岩某光伏电站，其光伏校正参数如表 2 所示。

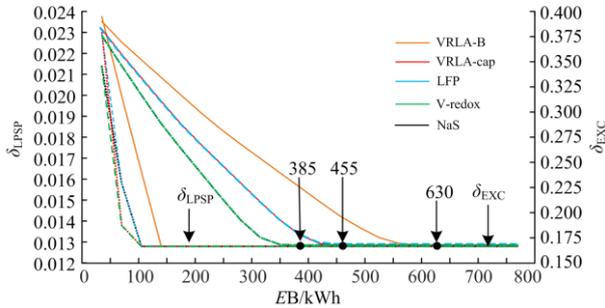


图 7 考虑电网分时电价时光伏定容下储能容量对  $\delta_{LSP}$ 、 $\delta_{EXC}$  的影响

Fig. 7 Influence of energy storage capacity on  $\delta_{LSP}$  and  $\delta_{EXC}$  considering the fixed capacity of time-sharing electricity price

表 1 不同类型储能电池特性参数

Table 1 Characteristic parameters of different types of energy storage batteries

参数	VRLA-B	VRLA-cap	LFP	V-redox	NaS
效率 $\eta/\%$	0.75	0.75	0.85	0.70	0.70
寿命 $n/a$	5	3.5	10	10	15
SOC 范围	0.3~0.7	0.1~0.8	0.2~0.8	0.1~0.9	0.2~0.9
$C_E/(\text{元}/\text{kW})$	1240	1040	3224	3720	2790
$C_D/(\text{元}/\text{kW})$	1085	850	1085	1085	930
$C_B/(\text{元}/\text{kW} \cdot \text{h})$	310	310	0	186	0
$C_F/(\text{元}/\text{kW} \cdot \text{a})$	31	31	155	124	124
$C_P/(\text{kW} \cdot \text{h})$	24	23	24	20	20

表 2 光伏校正参数

Table 2 Photovoltaic correction parameters

参数	值
太阳时角 $\omega$	$0^\circ$
地理纬度 $\varphi$	$25.13^\circ$
光伏安装角度 $\beta$	$20^\circ$
大气透射率 $K$	0.32
太阳赤纬角 $\delta$ (9月18号)	$4.06^\circ$
最大功率温度系数 $\gamma$	-0.43%

为准确校正光伏输出，需要确定光辐实际照度与光伏电池板温度，由式(10)对光辐照度进行修正，图 3(a)为光辐照度修正曲线，图 8 为光伏电池板实际温度曲线。

将光辐照度数据与电池板温度数据代入式(11)，由此可得校正后光伏装机容量为 159 kW，图 9 对比了校正后的光伏装机容量、实际测试装机容量

量典型曲线下的装机容量的输出功率曲线，由此得出校正后的装机容量更符合当地实际装机容量曲线。

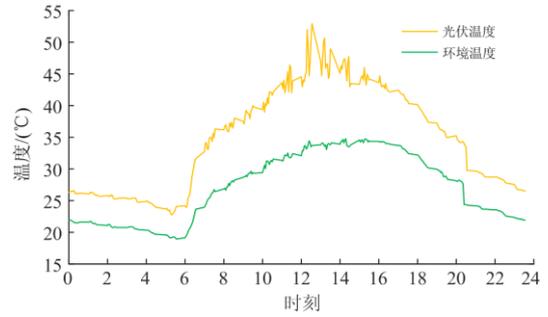


图 8 光伏温度与环境温度曲线

Fig. 8 PV temperature and ambient temperature curve

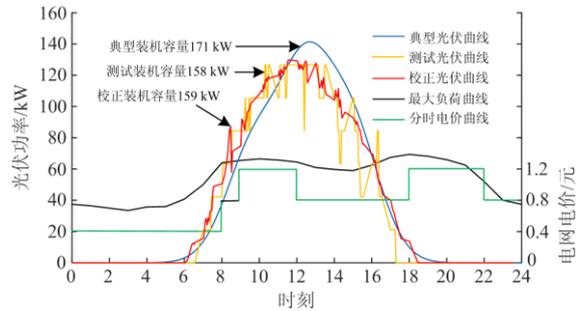


图 9 考虑分时电价时光伏校正发电曲线

Fig. 9 PV-corrected power generation curve considering time-of-use electricity prices

项目周期为 20 年，考虑光伏校正以及分时电价的光储配置结果如表 3 所示。

表 3 考虑电网分时电价下光储联合配置结果

Table 3 Result of combined allocation of optical storage considering time-of-use electricity price of power grid

配置项	VRLA-B	VRLA-cap	LFP	V-redox	NaS
光伏理论容量/kW	171	171	171	171	171
光伏实际装机容量/kW	159	159	159	159	159
储能容量/kWh	630	455	455	385	385
$\delta_{LSP}$	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
$\delta_{EXC}$	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
储能年均成本/元	2 665.6	2 766.1	4 048.9	5 706.1	4 196.4
储能更换次数/次	3	5	1	1	1
储能初始投资/万元	41.98	20.98	92.11	109.84	80.78
储能总投资/万元	167.93	125.86	184.22	219.69	161.56

从表 3 可知，在同一光伏储能系统中，VRLA-B 所需储能容量最高，其次为 VRLA-cap 和 LFP，而 V-redox 和 NaS 所需储能容量最小。在项目周期内的总投资成本方面：NaS 成本最高，VRLA-cap 成

本最低, VRLA-B、V-redox 和 LFP 三种电池项目周期内的总投资成本整体相当。

## 5 结论

论文针对并网型微电网中储能容量优化配置的问题, 提出一种光伏优化模型, 并建立光储一体配置模型, 获得储能最优配置结果。

(1) 考虑温度和光照强度的影响, 按地域特性对光伏实际发电功率进行校正, 建立光伏优化模型, 精确光伏输出功率, 有效避免按理论出力配置后出现的光伏弃光或功率不足现象, 更满足系统运行的实际情况。

(2) 在满足负荷缺电率和能量溢出比工程约束的基础上, 对光伏和储能进行一体化配置建模, 以成本最优为目标, 确定储能容量和光伏装机容量。

(3) 为验证所提光伏优化模型的有效性, 将所建立光伏模型的校正结果与福建龙岩某光伏电站的测试数据进行对比, 结果证明了本优化模型的合理性。其次, 以该地一商场的用电量为基准进行光储配置, 并利用光伏校正模型对理想的光伏装机容量进行校正。最后, 以经济最优为目标在电网分时电价下对典型的五种电池进行容量配置, 结果表明, 在项目周期内 NaS 成本最高, VRLA-cap 成本最低, VRLA-B、V-redox 和 LFP 三种电池总投资成本相当。

文章研究结果对并网型光储一体化系统的建设提供了配置的参考依据。

## 参考文献

- [1] 刘勤, 魏明奎, 周全, 等. 计及电量成本和系统自供电可靠性的西南地区微电网容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 139-145.  
LIU Qin, WEI Mingkui, ZHOU Quan, et al. Optimal allocation of microgrid capacity considering power cost and system self-supply reliability in Southwest China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 139-145.
- [2] 唐权, 胥威汀, 叶希, 等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 83-92.  
TANG Quan, XU Weiting, YE Xi, et al. Optimal allocation of distributed energy storage systems in distribution networks with the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 83-92.
- [3] 凌婵惠, 郑常宝, 胡存刚, 等. 考虑储能充放电效益的孤岛微电网经济优化模型[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 111-120.  
LING Chanhui, ZHENG Changbao, HU Cungang, et al. An economic optimization model for an isolated microgrid considering the benefits of energy storage and discharge[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 111-120.
- [4] 佟新, 胡存刚, 芮涛. 基于主从博弈的多微电网系统经济优化方法[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 68-76.  
DONG Xin, HU Cungang, RUI Tao. An economic optimization method for multi-microgrid system based on master-slave game[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 68-76.
- [5] YU Z, JUNHUA Z, YUE S, et al. Optimal operation of battery energy storage system considering distribution system uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(3): 1051-1060.
- [6] KONG Fanxin, DENG Chuansheng, LIU Xue, et al. Quantity versus quality: optimal harvesting wind power for the smart grid[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(11): 1762-1776.
- [7] 李建林, 马会荫, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.  
LI Jianlin, MA Huiyin, YUAN Xiaodong, et al. A review of key application technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [8] 李欣然, 周婷婷, 黄际元. 跟踪风电计划出力下的混合储能系统容量配置[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2194-2200.  
LI Xinran, ZHOU Tingting, HUANG Jiyuan. To track the capacity configuration of hybrid energy storage system under the planned output of wind power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2194-2200.
- [9] 葛乐, 袁晓冬, 王亮, 等. 面向配电网优化运行的混合储能容量配置[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3506-3513.  
GE Le, YUAN Xiaodong, WANG Liang, et al. Hybrid energy storage capacity configuration for optimal operation of distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3506-3513.
- [10] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等. 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 23-30.  
WU Jie, WEN Chenyang, LI Shan, et al. Optimal allocation of PV and accumulate system based on time-of-use price[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(1): 23-30.
- [11] 朱青, 曾利华, 寇凤海, 等. 考虑储能并网运营模式的工业园区风光燃储优化配置方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 23-31.  
ZHU Qing, ZENG Lihua, KOU Fenghai, et al. Study on the optimal configuration method of landscape fuel storage in industrial parks considering the grid-connected operation mode of energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 23-31.

- [12] 唐小波, 邓凯, 冯雨龙, 等. 一种基于火焰传播模型的储能容量优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 54-61.  
TANG Xiaobo, DENG Kai, FENG Yulong, et al. An optimization method of energy storage capacity based on flame propagation model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 54-61.
- [13] 李斐, 黎灿兵, 孙凯, 等. 微电网中混合储能系统的规划运行一体化配置方法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 453-460.  
LI Fei, LI Canbing, SUN Kai, et al. Integrated planning and configuration method for hybrid energy storage system in microgrid[J]. Control Theory and Applications, 2019, 36(3): 453-460.
- [14] 刘星, 崔双喜. 孤岛与重构相配合的配电网故障恢复策略[J]. 华电技术, 2020, 42(1): 29-34.  
LIU Xing, CUI Shuangxi. Fault recovery strategy for distribution network with isolated island and reconfiguration[J]. Huadian Technology, 2020, 42(1): 29-34.
- [15] 李顺昕, 岳云力, 武冰清. 与需求响应联合优化的联网型微电网储能容量随机规划[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 124-130.  
LI Shunxin, YUE Yunli, WU Bingqing. Stochastic planning for energy storage capacity of internet-based microgrid combined optimization with demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 124-130.
- [16] LI W, JOÓS G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm[C] // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, FL, USA: 1280-1285.
- [17] JIANG Q Y, HONG H S. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [18] BIAN H H, WANG X F, DING M S, et al. Optimal hybrid capacity configuration for distributed energy storage systems[J]. International Journal of Simulation: Systems, 2016, 17(37): 21-28.
- [19] WU T Z, SHI X, LIAO L, et al. A capacity configuration control strategy to alleviate power fluctuation of hybrid energy storage system based on improved particle swarm optimization[J]. Energies, 2019, 12(4).
- [20] MARNAY C, LAI J, STADLER M, et al. Added value of reliability to a micro-grid: simulations of three California buildings[C] // CIGRE, 2009, USA: 29-31.
- [21] XU D, KANG L, CHANG L, et al. Optimal sizing of standalone hybrid wind/PV power systems using genetic algorithms[C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 1-4, 2005, Saskatoon, SK, Canada: 1722-1725.
- [22] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于 Bloch 球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 592-599.  
MA Suliang, MA Huimeng, JIANG Xiaoping, et al. Capacity allocation of hybrid energy storage system based on Bloch spherical quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 592-599.
- [23] 李文, 陈海东, 崔战涛, 等. 基于离散傅里叶频谱分析的直流配电网储能规划配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 92-98.  
LI Wen, CHEN Haidong, CUI Zhantao, et al. Energy storage planning and allocation method of DC distribution network based on DISCRETE Fourier Spectrum analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 92-98.
- [24] 吴红斌, 顾细, 赵波, 等. 蓄电池充放电管理的全过程仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 843-849.  
WU Hongbin, GU Xiang, ZHAO Bo, et al. Study on the whole process simulation of battery charge and discharge management[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8): 843-849.
- [25] 周芳, 胡明辅. 铅锤面上太阳辐射计算方法探讨[J]. 太阳能研究与应用, 2007, 35(5): 55-59.  
ZHOU Fang, HU Mingfu. The calculation method of solar radiation on plumb plane is discussed[J]. Solar Energy Research and Application, 2007, 35(5): 55-59.
- [26] 薛金花, 叶季蕾, 陶琼, 等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2471-2476.  
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Economic feasibility study of user-side battery energy storage using life-cycle cost model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2471-2476.
- [27] 李建林, 牛萌, 田立亭, 等. 光伏扶贫电站光-储协同配置方法研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 79-86.  
LI Jianlin, NIU Meng, TIAN Liting, et al. Research on light-storage cooperative configuration method of photovoltaic poverty alleviation power station[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 79-86.

收稿日期: 2020-08-02; 修回日期: 2020-10-13

作者简介:

陈景文(1978—), 男, 博士, 副教授, 从事电力电子与电力传动研究; E-mail: chenjw@sust.edu.cn

肖妍(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 从事微电网储能研究。E-mail: 704374768@qq.com

(编辑 张爱琴)