

光储系统并网功率波动平抑及储能优化配置

赵斌¹, 梁告¹, 姜孟浩², 邹港¹, 王力¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410114;
2. 深圳本贸科技股份有限公司, 广东省 深圳市 518057)

Grid-Connected Power Fluctuation Suppression and Energy Storage Optimization Configuration of Photovoltaic-Energy Storage System

ZHAO Bin¹, LIANG Gao¹, JIANG Menghao², ZOU Gang¹, WANG Li¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan Province, China; 2. Shenzhen Bornsales Science & Technology Co., Ltd., Shenzhen 518057, Guangdong Province, China)

摘要:【目的】电池储能是保证光伏发电系统可靠性、提高光伏发电利用率的有效手段之一,但在光储电站中存在功率波动平抑难、储能容量配置不合理等问题,为解决这些问题,开展了相关研究。【方法】针对能量型电池储能,分析了调度模式和自主模式特性,提出了一种基于储能运行在调度模式的光储系统限功率平抑策略,以实现功率平抑和减少储能充放电频繁切换。建立了以最小光储系统弃电损失为优化目标,以功率波动越限概率等作为约束条件的优化模型,并利用算法对储能配置进行求解和优化。以西藏朗明桑珠孜50 MW光储电站为例,验证了所提平抑策略的有效性。【结果】所提平抑策略在不增加储能充放电切换次数的前提下,将光储系统并网功率波动越限概率由25.64%降至6.41%,且并网功率波动越限概率为5%时,该50 MW并网光伏电站储能系统最优配置为14.5 MW/94 MW·h。【结论】所提平抑策略及储能优化配置方法可为并网光储电站优化设计和运行提供技术参考。

关键词: 光伏发电; 光储系统; 电池储能系统; 波动平抑; 优化配置

ABSTRACT: [Objectives] Battery energy storage system is one of the effective means to ensure the reliability of photovoltaic (PV) power generation system and improve the utilization rate of PV power generation. However, there are some problems in the PV-energy storage power station, such as the difficulty of power fluctuation suppression and the unreasonable configuration of energy storage capacity. In order to solve these problems, relevant research was carried out. [Methods] For energy-based battery energy storage, the

characteristics of scheduling mode and autonomous mode were analyzed, and a power-limited suppression strategy of PV-energy storage system based on energy storage operation in scheduling mode was proposed to realize power suppression and reduce the frequency of energy storage charge/discharge switching. The optimization objective of minimizing abandoned power losses in the PV-energy storage system was established, with constraints such as the probability of power fluctuation exceeding the limit. An algorithm was used to solve and optimize the energy storage configuration. Taking the 50 MW Sangzhuzi PV-energy storage power station in Langming, Tibet as an example, the effectiveness of the proposed grid-connected power suppression strategy was validated. [Results] The proposed grid-connected power suppression strategy can reduce the probability of power fluctuation exceeding the limit from 25.64% to 6.41% without increasing the frequency of energy storage charge/discharge switching. When the probability of grid-connected power fluctuation exceeding the limit is 5%, the optimal configuration for the energy storage system of the power station is determined to be 14.5 MW/94 MW·h. [Conclusions] The proposed power fluctuation suppression strategy and energy storage optimization configuration method can provide technical reference for the optimal design and operation of grid-connected PV-energy storage system.

KEY WORDS: photovoltaic power generation; photovoltaic-energy storage system; battery energy storage system; fluctuation suppression; optimization configuration

0 引言

为应对环境污染和气候变化问题,世界各国的能源电力系统正处于低碳化、清洁化和智能化

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2023JJ30048)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ30048).

转型阶段，推动发展低碳、清洁、高效能源是实现社会可持续发展的必然选择^[1-3]。光伏发电因具有绿色、无污染等特点，得到了快速发展。然而，光伏发电具有随机性、间歇性、波动性，随着光伏发电装机容量的增大，电网电压、电能质量、运行控制等受到越来越大的影响，对电网安全稳定运行造成威胁^[4-9]。光储联合发电技术能够有效保证系统可靠性，提高电网稳定运行^[10]。

在光伏系统输出功率波动平抑方面，指数平滑法、低通滤波算法^[11]、小波包分解法^[12]等传统方法在平抑并网功率波动时，存在延迟、抑制效果差以及对储能系统要求较高等问题。基于预测技术能够较好地解决光伏输出功率平抑目标与实际功率曲线之间的延迟现象^[13]。文献[14]利用基于跟随行为的人工鱼群算法对BP神经网络参数进行优化，对光伏系统输出功率进行预测，提高了预测速度和精度。文献[15]针对风力发电的超短期预测，提出了一种自回归滑动平均模型，具有较好的预测结果。为了应对因光照强度波动大而造成的输出功率波动问题，采用限功率控制策略消去功率波峰^[16]，亦有助于减小蓄电池储能动作次数、平抑蓄电池电流与电压波动，延长使用寿命^[17]。

在光储系统输出功率波动平抑方面，能量型储能电池频繁充放电会严重缩短储能系统使用寿命^[18]。为此，文献[19]对比分析了各类电池特性，探索了光伏-混合储能在提高电能质量方面的潜力。文献[20]将铅酸电池和超级电容器通过模块化电力电子柜互联的混合储能用于电网调峰、光伏输出功率抑制，并通过兆瓦级光储系统进行验证，结果表明，混合储能比单一储能抑制效果更好。混合储能能够解决单一储能技术在平抑光储系统输出功率波动时存在的不足，但目前功率型储能电池价格仍然较高，且混合储能运行控制复杂，安全性较单一储能更低。对于不同的能量存储需求，光储系统中对储能系统运行模式可采用自主模式和调度模式2种^[21]，其中：在调度模式下，光储系统功率波动平抑效果不佳；在自主模式下，储能系统进行频繁充放电切换，会降低储能使用寿命。因此，需探究储能运行模式，以兼

顾功率波动平抑和储能性能的需求。限功率控制为研究改进的储能充放电控制策略提供了思路。

电池储能系统的优化配置包括对容量和储能充放电功率的优化配置^[22-24]。根据优化目标不同，可分为以能源利用率、系统可靠性和经济性等为目标的储能优化配置^[25]。文献[26]针对储能系统用于平滑光伏发电短时功率波动时的配置问题，建立以储能系统初始投资成本、储能运行维护成本和波动越限惩罚成本为目标的光储系统经济模型，并利用遗传算法进行储能最优功率配置求解。文献[27]基于蒙东地区新能源消纳问题，以电压偏差、储能投资成本和网络损耗最小为优化目标，建立多目标优化的数学模型，利用改进线性递增惯性权重的粒子群优化算法进行求解，确定促进该地区新能源发电的储能系统容量配置。

本文以西藏自治区日喀则市朗明桑珠孜光储电站为例，提出了一种基于限功率的光储系统输出功率平抑策略。该策略以储能系统运行在恒功率充电的调度模式为基础，利用光伏限功率控制以及灵活调节磷酸铁锂电池的充电功率进行波动平抑，进而以光储系统弃电损失最小为目标进行储能功率、容量优化配置，并以功率波动越限概率等为约束条件，利用灰狼算法进行优化求解。

1 光储系统并网功率波动特性

并网功率波动率和波动量是衡量光储并网系统输出功率稳定和可靠性的重要指标。波动量是某一时间区间内光储系统并网功率最大值与最小值之差，其与光伏发电系统装机容量的比值为并网功率波动率。波动率越小，系统输出功率波动越小，系统运行越稳定。光储系统并网功率波动量 ΔP_g 与波动率 σ 表达式分别如下：

$$\Delta P_g = P_{\max} - P_{\min} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\Delta P_g}{P_c} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_c} \quad (2)$$

式中： P_{\max} 、 P_{\min} 分别为采样周期内并网功率最大值和最小值，MW； P_c 为光伏装机容量，MW。

朗明桑珠孜光储电站在2021年9月23日的光伏发电系统输出功率10 min变化曲线如图1所示。该电站光伏发电系统装机容量为50 MW，配置

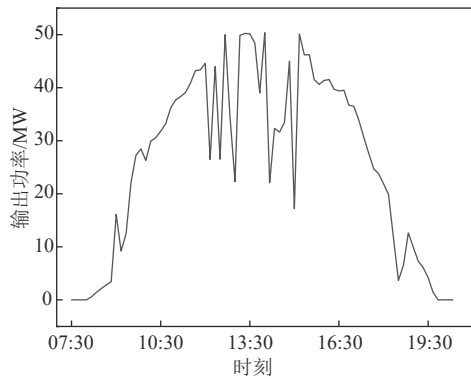


图1 光伏发电系统典型日输出功率变化曲线

Fig. 1 Typical daily output power variation curve of photovoltaic power generation system

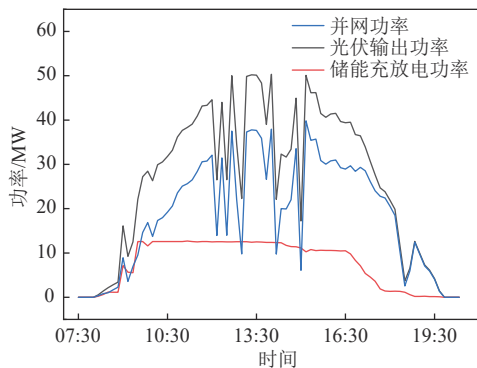
12.5 MW/100 MW·h 磷酸铁锂电池储能，用于吸收光伏发电系统输出能量。

由图 1 可知，该日光伏发电系统输出功率存在较大波动，最大波动量为 32.9 MW，波动率为 65.8%，且存在多次大幅度功率波动现象。

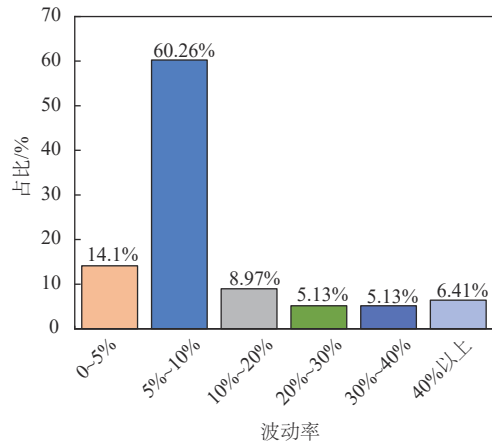
不同运行模式下，对储能的需求及光储系统输出功率变化均不同。根据朗明桑珠孜光储电站实际运行数据，储能运行在恒功率充电的调度模式时，光伏输出功率、储能充放电功率、并网功率变化以及并网功率波动特性如图 2 所示。

由图 2 可知，在调度模式下，储能系统仅进行充放电，实现了时空上的能量转移，并网功率 10 min 波动率在 10% 以上的占比为 25.64%，在 40% 以上的占比为 6.41%，并网功率存在较大的波动率尖峰值，电能质量受到一定影响。

利用电池储能技术快速充放电的特性，控制储能系统运行在自主模式，能够实现对系统并网功率波动的有效抑制。储能运行在自主模式时，各功率变化及并网功率波动特性如图 3 所示。



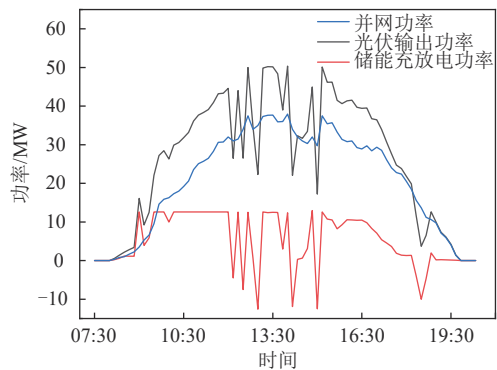
(a) 光储系统功率变化曲线



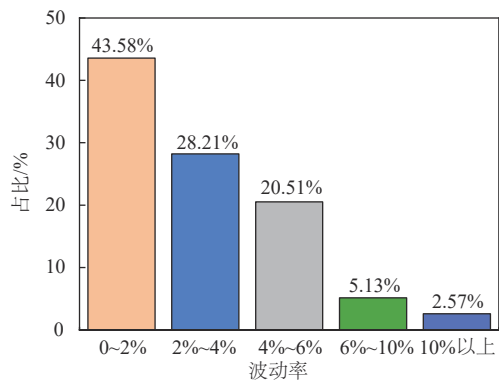
(b) 并网功率波动特性

图 2 储能系统运行在调度模式下的功率变化

Fig. 2 Power changes of energy storage system operation in scheduling mode



(a) 光储系统功率变化曲线



(b) 并网功率波动特性

图 3 储能系统运行在自主模式下的功率变化

Fig. 3 Power changes of energy storage system operation in autonomous mode

由图 3 可知，在自主模式下，并网功率波动率基本小于 10%，波动率在 10% 以上的占比仅为 2.57%，光储系统并网功率波动得到了明显抑制，具有较好的平抑效果。但运行在自主模式时，储

能系统需要频繁充放电，将会严重缩短电池的使用寿命。因此，针对能量型磷酸铁锂电池，在保证储能系统使用寿命的前提下，本文提出一种光储并网系统输出功率平抑策略。

2 光储系统并网功率波动平抑策略

2.1 并网功率约束

根据国家标准 GB/T 19964—2012^[28] 和 GB/T 38993—2020^[29] 规定，并网光储电站正常运行时，由于太阳辐照度增长，导致有功功率变化，其变化速率应满足电力系统安全稳定运行的要求。对于超出波动上限的功率，需通过调节光伏并网逆变器进行弃光处理。当由太阳辐照度降低引起的并网功率波动量大于波动限值时，不做约束要求。在此基础上，结合电池储能系统使用寿命约束，制定光储系统并网功率约束规则，具体如下：

1) 当太阳辐照度突增引起并网功率波动大于波动允许值时，通过增大储能系统充电功率吸收高于并网功率波动要求的功率。若储能系统以最大功率充电，或储能系统吸收电量超出储能电池荷电状态(state of charge, SOC)最大值，则调节光伏并网逆变器进入限功率跟踪控制，通过减小光伏系统输出功率，使得并网功率满足要求。

2) 当太阳辐照度突降引起并网功率波动大于波动允许值时，调节光伏发电系统运行在最大功率输出状态，此时若波动仍不满足并网功率波动要求，则通过减小储能系统充电功率来削弱并网功率波动。

2.2 光伏限功率控制策略

当并网功率未发生波动或波动量较小时，光伏系统运行在最大功率跟踪模式，光伏输出功率优先为储能系统充电。

当并网功率出现较大的负向波动，即太阳辐照度突降导致光伏发电系统输出功率下降而引起的波动时，首先保证光伏发电系统运行在最大功率跟踪模式，然后通过减小储能系统充电功率来削弱并网功率波动。

当并网功率出现较大的正向波动，即太阳辐照度突升导致光伏发电系统输出功率急剧上升而引起的波动时，若控制储能系统以最大功率充电

仍不能满足并网功率波动需求，则切换光伏发电系统由最大功率控制进入限功率控制，通过抑制光伏输出功率的最大值来保证并网功率满足要求。光伏限功率控制策略实现流程如图4所示。

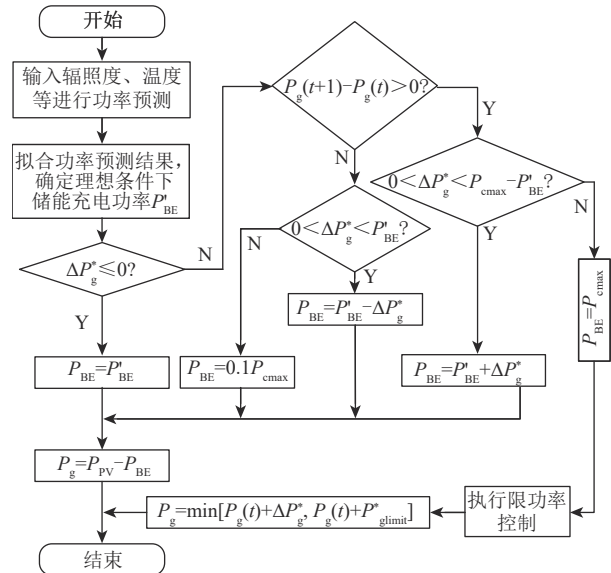


图4 光伏限功率控制策略流程图

Fig. 4 Flow chart of photovoltaic output power curtailment control strategy

2.3 储能充放电控制策略

为保证电池储能系统使用寿命，并网功率平抑策略以储能系统运行在恒功率充电的调度模式为基础，在电能输出阶段，储能系统仅进行充电动作，不进行放电切换。

结合光伏系统输出功率预测技术，将预测得到的光伏系统输出功率 P_{pv} 进行线性拟合，根据拟合结果制定理想条件下的储能系统充电功率 P'_{BE} 。理想条件下光储系统输出结果如图5所示。

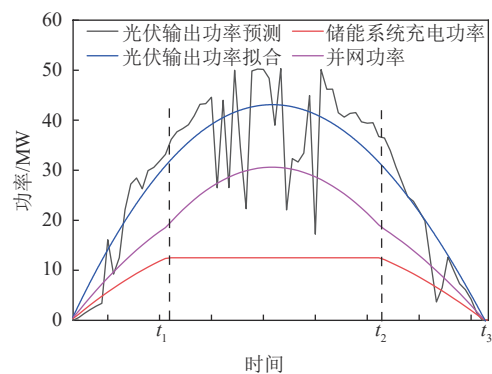


图5 理想条件下光储系统功率变化

Fig. 5 Power change of photovoltaic-energy storage system under ideal conditions

从图5可以看出,储能系统充电分为以下3个阶段:0— t_1 时段,太阳辐照度较低, P_{PV} 较小,此时储能系统以一定比例的光伏系统输出功率进行充电,充电功率随着 P_{PV} 的增大而增大; t_1 — t_2 时段,随着太阳辐照度的不断升高, P_{PV} 不断增大,最终能够在满足储能系统以最大功率充电的同时,保证并网功率为一条较为平滑的曲线,此时储能系统以最大充电功率 P_{cmax} 充电; t_2 — t_3 时段,光伏系统输出功率随着太阳辐照度的降低而逐渐减小,且储能系统已存储了大量能量,此时调整 P'_{BE} 逐渐减小,防止储能系统过充的同时保证并网功率曲线平滑。

理想条件下, $P'_{BE}(t)$ 表达式为

$$P'_{BE}(t) = \begin{cases} nP_{PV}, & 0 < t < t_1, t_2 < t < t_3 \\ P_{cmax}, & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 n 为0~1的常数,且 n 为满足式(4)条件下的最小值。

$$\int_0^{t_1} nP_{PV} dt + (t_2 - t_1)P_{cmax} + \int_{t_2}^{t_3} nP_{PV} dt = E_{BE} \quad (4)$$

式中 E_{BE} 为储能系统总容量, MW·h。

实际运行中,若在晴朗天气下光伏输出功率波动较小甚至无波动时,储能系统执行所述充电功率控制策略,以 P'_{BE} 进行充电,此时并网功率 P_g 为 P_{PV} 与 P'_{BE} 的差值,即

$$P_g = P_{PV} - P'_{BE} \quad (5)$$

若光伏输出功率存在较大负向波动时,尤其是在 t_1 — t_2 时段内,根据并网功率波动越限量 ΔP_g^* 实时调整储能系统的充电功率,进而减小并网功率波动量。 ΔP_g^* 表达式如下:

$$\Delta P_g^* = \Delta P_g - \Delta P_{glimit} \quad (6)$$

式中 ΔP_{glimit} 为并网功率波动允许限值, MW。

此时,并网功率波动量 ΔP_g 表达式为

$$\Delta P_g = |P_g(t+1) - P_g(t)| \quad (7)$$

根据并网功率波动方向的不同,结合 $P'_{BE}(t)$ 、 ΔP_g^* 大小,制定不同情况下储能系统充电功率。

当并网功率出现负向波动时,下一采样时刻储能系统充电功率 $P_{BE}(t+1)$ 表达式为

$$P_{BE}(t+1) = \begin{cases} P'_{BE}(t+1), & \Delta P_g^* \leq 0 \\ P'_{BE}(t+1) - \Delta P_g^*, & 0 < \Delta P_g^* < P'_{BE}(t) \\ 0.1P_{cmax}, & \Delta P_g^* \geq P'_{BE}(t) \\ 0, & SOC < 0, SOC > 1 \end{cases} \quad (8)$$

当并网功率出现正向波动,且当前采样时刻储能系统充电功率为 P_{cmax} 时,下一采样时刻充电功率仍为 P_{cmax} 。

当并网功率出现正向波动,但当前采样时刻储能系统充电功率小于 P_{cmax} 时,下一采样时刻储能系统充电功率 $P_{BE}(t+1)$ 表达式为

$$P_{BE}(t+1) = \begin{cases} P_{BE}(t), & \Delta P_g^* \leq 0 \\ \min[P_{BE}(t) + \Delta P_g^*, P_{cmax}], & 0 < \Delta P_g^* \leq P_{cmax} - P_{BE}(t) \\ P_{cmax}, & \Delta P_g^* > P_{cmax} - P_{BE}(t) \\ 0, & SOC < 0, SOC > 1 \end{cases} \quad (9)$$

3 储能优化配置

3.1 目标函数

光伏限功率控制能有效消除并网功率正向波动,且对负向波动也有一定的抑制效果。但受限于储能功率和容量配置,采用光伏限功率控制会造成一定的弃电损失。因此,以光储电站弃电损失最小为目标,在满足光储系统并网波动要求下构建弃电损失函数,并通过优化求解最优配置,提高光储系统效益。目标函数表示如下:

$$\min F = W_{ar} \quad (10)$$

式中 W_{ar} 为光储系统弃电量, MW·h。

由光储系统输出功率平抑策略可知,储能用于平抑光储并网系统输出功率波动时,弃电量 W_{ar} 主要受储能系统最大充电功率、储能容量和并网功率波动影响,表达式如下:

$$W_{ar} = W_1 + W_2 \quad (11)$$

式中 W_1 为储能系统充电过程中光伏发电系统运行在限功率控制模式时造成的电能损失,表达式为

$$W_1 = \sum_{t=0}^N k_1(t) [P_{PV}(t) - P_g(t) - P_{BE}(t)] \Delta t \quad (12)$$

式中: N 为总采样周期; Δt 为采样间隔;系数 $k_1(t)$ 表达式为

$$k_1(t) = \begin{cases} 1, & P_{PV}(t) - P_g(t) > P_{BE}(t) \\ 0, & P_{PV}(t) - P_g(t) \leq P_{BE}(t) \end{cases} \quad (13)$$

W_2 为充电过程中储能系统因受容量约束,无法继续充电而形成的多余电能,需进行弃电处理,表达式为

$$W_2 = \sum_{t=0}^N k_2(t) (P_{PV} - P_g) \Delta t \quad (14)$$

式中系数 $k_2(t)$ 表达式为

$$k_2(t) = \begin{cases} 1, & E_{BE}(t) \geq E_{max} \\ 0, & E_{BE}(t) < E_{max} \end{cases} \quad (15)$$

3.2 约束条件

约束条件包括输出功率波动约束、储能系统功率及容量约束、净充/放电电量约束。

采用光伏限功率控制策略可完全平抑光储系统正向功率波动，而负向功率波动在光储系统并网时不受约束，但为了保证系统稳定运行，在光储系统并网时应尽可能将功率波动抑制到较小值。引入功率波动越限概率约束，通过设定越限概率限值，使系统输出功率具备一定的越限范围，能够忽略极端波动所需的较大储能功率配置。功率波动越限概率表达式如下：

$$P_{roba} \left\{ \left| \frac{P_g(t) - P_g(t-1)}{P_{PV}} \right| > 10\% \right\} < \theta \quad (16)$$

式中： P_{roba} 为并网功率波动率高于并网要求的概率； θ 为并网功率波动越限概率限值。

光储系统运行时，为防止储能电池过充、过放，需对储能系统容量进行约束，表达式为

$$E_{min} \leq E_{BE}(t) \leq E_{BE} \quad (17)$$

式中 E_{min} 为储能容量下限，MW·h。

光伏发电系统输出功率不为0期间，储能系统仅进行充电，且充电功率不大于最大允许充电功率，即

$$0 < P_{BE}(t) \leq P_{cmax} \quad (18)$$

为保证储能连续稳定运行，一个充放电周期内，应保证储能系统净充/放电电量为0，即

$$\Delta E = \sum_{t=0}^N [P_{BE}(t)\Delta t] = 0 \quad (19)$$

针对目标函数和约束条件，使用基于自适应罚函数的灰狼优化算法进行优化求解，具有参数少、结构简单、易实现等优点。

4 仿真验证与分析

以朗明桑珠孜 50 MW 光储电站为例，对所提光储系统并网功率波动平抑策略进行了仿真验证，并在此基础上，利用基于自适应罚函数的灰狼算法对电池储能系统优化配置进行求解。基本仿真参数设置如下：光伏发电系统装机容量 P_c 为

50 MW；磷酸铁锂电池储能系统容量 E_{BE} 为 100 MW·h，最大充/放电功率为 12.5 MW；并网功率波动允许范围为 $\pm 10\%P_c/10 \text{ min}$ 。

4.1 并网功率波动平抑仿真

选取夏季多云天气运行数据进行光储系统并网功率波动平抑策略仿真验证，仿真结果如图6、7所示。可以看出，该策略具有较好的平抑效果，并网功率波动率基本维持在10%以下，相较于储能系统进行恒功率充放电，波动越限概率降低了19.23%。

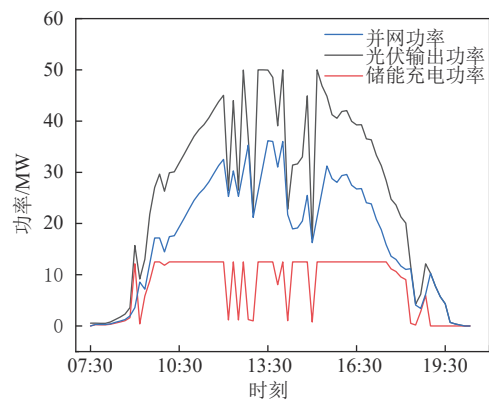


图6 光储系统功率变化

Fig. 6 Power change of photovoltaic-energy storage system

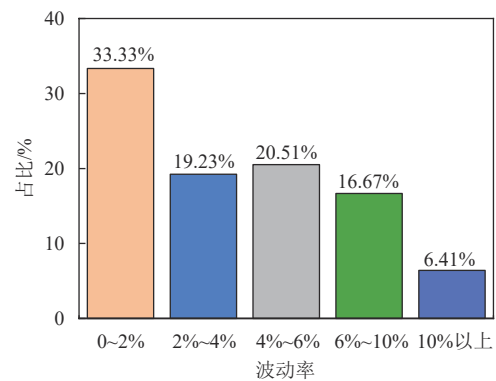


图7 光储系统并网功率波动特性

Fig. 7 Grid-connected power fluctuation characteristics of photovoltaic-energy storage system

由图6可知，当光照充足时，储能系统用于吸收存储电能。07:40—9:40，太阳辐照度较小，光伏发电系统输出功率较小，为保证并网功率曲线较为平滑，储能系统在该阶段以 $0.45P_{PV}$ 充电；09:40太阳辐照度达到 559.27 W/m^2 ，光伏系统输出功率达到 27.78 MW，此时储能系统开始以最大充

电功率充电；09:40—12:00，太阳辐照度未出现明显波动，储能系统始终以最大功率充电；12:10—15:10，光伏系统输出功率存在较为明显的波动，且波动量较大，此时动态调整储能系统充电功率和光伏系统运行状态，具有较好的平抑效果；17:30之后，由于太阳辐照度逐渐下降，光伏发电系统输出功率不断降低，且储能系统SOC趋近最大值，在此阶段，储能系统先以 $0.45P_{pv}$ 充电，当SOC为1时，储能系统停止充电。由图7可知，由于受储能系统功率限制，当光伏系统输出功率出现大幅度下降时，尽管控制储能系统以最小功率充电，仍无法满足并网功率波动需求，存在一定的波动越限，但越限概率较小，仅为6.41%。

在储能系统恒功率充电(工况I)、储能系统充放电平滑并网功率波动(工况II)和基于限功率的光储系统输出功率平抑策略(工况III)3种工况下，储能系统充放电功率、并网功率变化分别如图8、9所示。

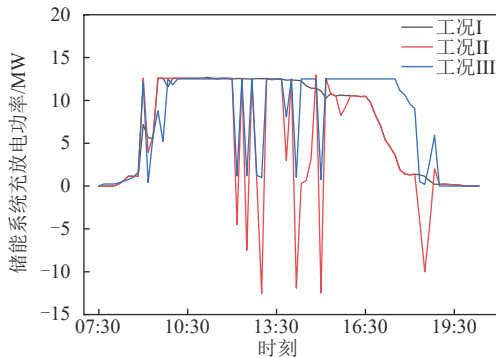


图8 不同工况下储能系统充放电功率变化

Fig. 8 Charge and discharge power changes of energy storage system under different working conditions

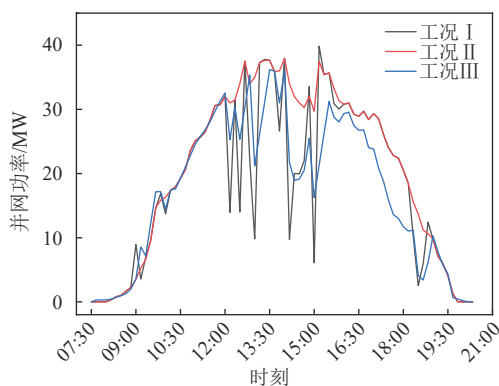


图9 不同工况下并网功率变化

Fig. 9 Grid-connected power changes under different working conditions

由图8可知，在一个发电周期内，工况I和III中储能系统仅进行充电，储能系统未进行充放电切换，而工况II为满足并网功率波动要求，进行了6次充放电切换且每次充电功率变化幅值较大，不利于储能电池的长期稳定运行。

由图9可知，工况II并网功率波动平抑效果最好，工况III次之，工况I并网功率存在较大波动；对比工况II、III可知，储能系统运行在工况III时，波动越限概率虽然增加了3.84%，但储能系统充放电切换次数并未增加，综合效益最佳。通过综合比较并网功率平抑效果及储能系统使用寿命可知，本文所提光储系统输出功率平抑策略具有较大的优越性。

4.2 储能优化配置

不同储能功率配置时光储系统弃电量、并网功率波动越限概率、最大波动量如表1所示。

表1 配置不同功率时光储系统输出评价指标

Tab. 1 Output evaluation index of photovoltaic-energy storage system with different power configurations

储能功率配置/ MW	弃电量/(MW·h)	波动越限 概率/%	最大波动量/ MW
0	33.97	7.50	21.81
5.0	22.57	7.50	21.81
10.0	15.00	6.25	18.57
12.5	11.15	6.25	16.07
15.0	9.65	5.00	13.15
17.5	7.70	5.00	12.17
25.0	6.18	2.50	7.87

由表1可知，波动越限概率和最大波动量随储能功率的增大呈非线性减小。通过分析可知，由于光储系统负向功率波动较大，在少量增加储能功率时对光储系统负向功率波动影响较小，波动越限概率和最大功率波动量无明显变化，当储能容量增大到与系统最大波动量相同时，能够实现光储系统输出功率波动的完全抑制。

以光储系统输出功率弃电量最小为目标，利用基于罚函数的灰狼算法进行优化求解，可得到不同功率配置时储能容量优化结果，如表2所示。

由表2可知，储能功率为12.5 MW时，优化后储能最优容量配置仅为81.68 MW·h，相较于原配置100 MW·h降低了18.32 MW·h。储能容量优

化前后光储系统输出功率变化曲线如图 10 所示。

表 2 不同功率配置时储能容量优化结果

Tab. 2 Optimization results of energy storage capacity with different power configurations

储能功率配置/MW	储能最优容量配置/(MW·h)	弃电量/(MW·h)
0	0	33.97
5.0	34.38	22.57
10.0	66.37	15.00
12.5	81.68	11.80
15.0	96.85	9.46
17.5	110.90	7.70
20.0	125.63	6.48

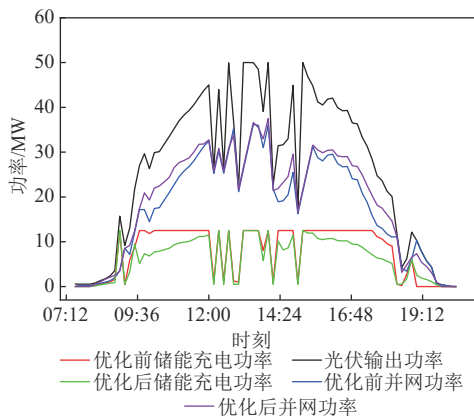


图 10 储能容量优化前后光储系统功率变化

Fig. 10 Power change of photovoltaic-energy storage system before and after energy storage capacity optimization

由图 10 可知，对储能容量进行优化后，其充电功率具有更大可调节性，并网功率更为平滑，储能容量优化有助于减少并网功率波动；储能容量优化前后，系统弃电量无明显影响。综上可知，储能容量优化后，有助于减少平抑光储系统输出功率波动时对储能系统的容量需求，且系统整体性能得到了提升。

由上述仿真结果可知，光储系统以 $\pm 10\%P_c/10 \text{ min}$ 为并网功率波动量限值且波动越限概率 θ 为 5%时，储能系统功率最优配置为 14.5 MW，对应的储能容量最优配置为 94 MW·h，在此配置下，光储系统输出功率变化如图 11 所示。

通过分析图 11 可知，在该配置下，光储系统输出功率整体性能较好，储能功率的增大更有助于平抑光储系统输出功率波动，相较于优化前，并网功率曲线得到了更好的平滑。在此配置下，

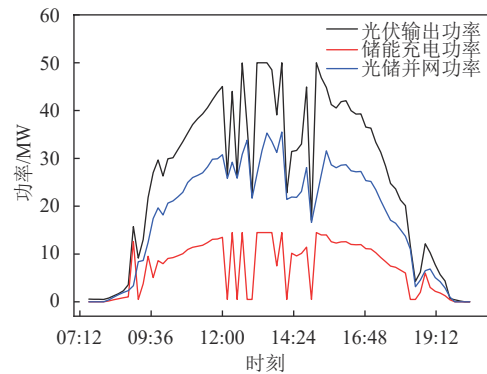


图 11 最优储能配置时光储系统功率变化

Fig. 11 Power change of photovoltaic-energy storage system under optimal energy storage configuration

光储系统弃电量为 9.9 MW·h，输出功率越限概率为 5%，输出功率最大波动量为 14.07 MW。

5 结论

为解决能量型电池储能系统平抑光伏发电系统输出功率波动时，因需要频繁充放电而导致储能电池使用年限缩短的问题，在储能系统恒功率充电运行基础上，提出了一种基于光伏限功率控制的并网功率波动平抑策略。针对该策略造成的光伏弃电损失，构建了以满足并网功率波动要求的光储系统弃电损失最小为目标的储能优化配置方案。结合朗明桑珠孜光储电站，利用 MATLAB 软件进行仿真分析，得到如下结论：

1) 利用储能技术缓解功率波动对电网造成的不利影响时，储能系统运行在调度模式有利于提高光储系统利用率，但会存在 25.64% 的功率波动越限概率；储能系统运行在自主模式时，能够将功率波动越限概率降低到 2.57%，但充放电切换次数增加了 6 次，不利于电池储能系统长期稳定运行。

2) 基于光伏限功率控制的并网功率平抑策略具有较好的平抑效果，并网功率正向波动得到了完全抑制；受储能系统最大充电功率限制，仍存在一定的负向功率波动，但最大波动率仅为 28.5%，波动越限概率为 6.41%。对比不同工况的运行结果可知，该平抑策略综合效益最佳。

3) 光储系统以 $\pm 10\%P_c/10 \text{ min}$ 为并网功率波动量限值且波动越限概率为 5%时，储能系统最优

功率/容量配置为14.5 MW/94 MW·h。在此配置下,系统弃电损失为9.9 MW·h,输出功率最大波动量为14.07 MW。在与原有功率配置相同(即储能功率为12.5 MW)时,对比优化前后的储能容量配置、系统弃电量和并网功率波动,可知优化后系统对储能容量的需求减少了18.32 MW·h,且并网功率波动得到了进一步平抑。

参考文献

- [1] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
ZOU C N, HE D B, JIA C Y, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.
- [2] 王鹏, 杜瑜铃, 王雁凌, 等. 欧洲战略备用机制对我国发电容量充裕性问题的启示[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 16-25.
WANG P, DU Y L, WANG Y L, et al. Enlightenment of european strategic reserve mechanism on the adequacy of power generation capacity in China[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 16-25.
- [3] 曾爽, 梁安琪, 王立永, 等. 考虑光储型电热协同系统灵活性的多代理削峰填谷策略[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 133-142.
ZENG S, LIANG A Q, WANG L Y, et al. Multi-agent peak shaving and valley filling strategy considering the flexibility of electric-thermal system with optical storage[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 133-142.
- [4] 李东东, 郭天洋, 刘庆飞, 等. 计及光伏发电的新能源电力系统惯量评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 174-179.
LI D D, GUO T Y, LIU Q F, et al. Inertia estimation of renewable power system considering photovoltaics[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 174-179.
- [5] 孙雯雯, 徐玉杰, 丁捷, 等. 高原高寒地区可再生能源与储能集成供能系统研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(4): 678-688.
SUN W W, XU Y J, DING J, et al. An energy system for the integration of renewable energy with energy storage in a frigid plateau region[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(4): 678-688.
- [6] 郭勇, 李秋燕, 马杰, 等. 新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 64-73.
GUO Y, LI Q Y, MA J, et al. Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 64-73.
- [7] 李宗隆, 柏舸, 胡剑, 等. 考虑光热光伏混合电站内外双重电压安全的两阶段无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 170-179.
LI Z L, BAI G, HU J, et al. Two-stage optimal reactive power control considering internal-external dual voltage security of a PV-CSP hybrid power station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 170-179.
- [8] 史加荣, 殷诏. 基于GRU-BLS的超短期光伏发电功率预测[J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 38-45.
SHI J R, Y Z. Prediction of ultra short term photovoltaic power generation based on GRU-BLS[J]. Smart Power, 2023, 51(9): 38-45.
- [9] 王立强, 丛雨, 曹斌, 等. 风光储联合发电系统数模混合仿真分析[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(4): 21-26.
WANG L Q, CONG Y, CAO B, et al. Digital-analog hybrid simulation analysis of wind-solar-storage hybrid generation system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(4): 21-26.
- [10] WANG K F, QIAO Y, XIE L R, et al. A fuzzy hierarchical strategy for improving frequency regulation of battery energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 689-698.
- [11] 庄雅妮, 杨秀媛, 金鑫城. 风光储联合发电运行技术研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 296-303.
ZHUANG Y N, YANG X Y, JIN X C. Study on operation technology of wind-PV-energy storage combined power generation[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(4): 296-303.
- [12] 李滨, 高崇杰, 吴思缘. 基于小波分析的光伏电站储能容量优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 35-41.
LI B, GAO C J, WU S Y. Optimization method for energy storage capacity of photovoltaic power station based on wavelet analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 35-41.
- [13] 张祥宇, 王玉珂, 付媛. 直流微电网的多端虚拟储能协调控制技术[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5):

- 109-119.
- ZHANG X Y, WANG Y K, FU Y. Multi-terminal virtual energy storage coordinated control technology for DC microgrids[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(5): 109-119.
- [14] 王胜辉, 王政宇, 陈姝, 等. 基于功率预测的光储发电系统控制策略优化[J]. *电源技术*, 2021, 45(8): 1055-1060.
- WANG S H, WANG Z Y, CHEN S, et al. Control strategy optimization of optical storage power generation system based on power prediction[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(8): 1055-1060.
- [15] TIAN J, LIU Z Y, SHU J, et al. Base on the ultra-short term power prediction and feed-forward control of energy management for microgrid system applied in industrial park[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(9): 2259-2266.
- [16] 楚冰清, 王侃, 张商州. 带限功率控制的光伏并网逆变器控制策略研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(5): 21-23.
- CHU B Q, WANG K, ZHANG S Z. Research on control strategy of PV grid-connected inverter with constrained production[J]. *Automation & Instrumentation*, 2017(5): 21-23.
- [17] 刘海涛, 马丙泰, 郝思鹏, 等. 考虑功率限值管理的光储系统建模及控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(11): 100-108.
- LIU H T, MA B T, HAO S P, et al. Modeling and control strategy for photovoltaic energy storage system considering power limit management[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(11): 100-108.
- [18] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于CEEMDAN-HT的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(21): 43-53.
- YAN Q M, LIU Y C, DONG X Z, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(21): 43-53.
- [19] RANA M M, UDDIN M, SARKAR M R, et al. A review on hybrid photovoltaic-battery energy storage system: current status, challenges, and future directions[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104597.
- [20] DÍAZ-GONZÁLEZ F, CHILLÓN-ANTÓN C, LLONCH-MASACHS M, et al. A hybrid energy storage solution based on supercapacitors and batteries for the grid integration of utility scale photovoltaic plants[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104446.
- [21] 乔俊强, 李世民, 虎学梅, 等. 光伏电站中储能系统接入与运行模式[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(6): 1345-1351.
- QIAO J Q, LI S M, HU X M, et al. Grid-connected photovoltaic power system with energy storage and operating mode[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(6): 1345-1351.
- [22] 李晓宇. 高渗透率光伏功率的波动平抑与储能优化配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LI X Y. PV power fluctuation mitigation and BESS capacity optimization in power grids with high PV power penetration[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [23] 刘建伟, 李学斌, 刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. *发电技术*, 2022, 43(3): 476-484.
- LIU J W, LI X B, LIU X O. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(3): 476-484.
- [24] 张中丹, 皮霞, 杨德州, 等. 电池储能电站替代变电站升级的优化决策配置方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 41-49.
- ZHANG Z D, PI X, YANG D Z, et al. Optimal decision-making configuration method for battery energy storage station to replace substation upgrades[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 41-49.
- [25] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(1): 1-18.
- LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 1-18.
- [26] ZHANG D L, CHEN Y C, WANG L Z, et al. Control strategy and optimal configuration of energy storage system for smoothing short-term fluctuation of PV power[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45: 101166.
- [27] 肖冰, 吴晓丹, 尹宏学, 等. 蒙东地区适应新能源消纳的储能系统配置效果分析[J]. *热力发电*, 2020, 49(7): 13-20.
- XIAO B, WU X D, YIN H X, et al. Configuration effect of energy storage system in Mengdong grid for new energy consumption[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(7): 13-20.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委

员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

[29] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏电站有功及无功控制系统的控制策略导则: GB/T 38993—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for control strategy of active and reactive power control system for photovoltaic power station: GB/T 38993—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

收稿日期: 2023-12-10。

修回日期: 2024-01-20。



赵斌

赵斌(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源科学技术及应用, zhaobin19680507@163.com;



梁告

梁告(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制与信息处理, 1772582108@qq.com;



姜孟浩

姜孟浩(1987), 男, 工程师, 研究方向为新能源发电技术, 923159699@qq.com;



邹港

邹港(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与低碳运行, 475033533@qq.com;



王力

王力(1990), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源发电技术、电力系统运行与控制技术, wangli@csust.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)