基于高比例新能源参与的储能系统容量优化研究

莫海勇

（中冶赛迪电气技术有限公司，重庆 401120）

摘要：“碳达峰、碳中和”发展目标的提出，将助推高比例新能源的规模化发展，势必给电网消纳带来重大负担。提出一种高比例新能源下储能共享模式的双层优化调度模型，量化分析储能的规划容量对新能源弃电率的影响。针对双层优化模型的复杂非线性化特点，利用改进的飞蛾扑火算法（Moth-Flame Optimization，MFO）对目标模型进行优化求解。最后利用修正的 IEEE-9 节点测试网络来验证所提模型和算法的合理性。

关键词：高比例新能源；储能；双层模型；飞蛾扑火算法；弃电率

Capacity optimization of energy storage system based on high proportion of new energy

MO Haiyong

(China Metallurgical Saidi Electric Technology Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The development goals of “carbon peak, carbon neutral” will boost the large-scale development of a high proportion of new energy, but also is bound to bring a significant burden to the grid consumption. In this paper, a dual-layer optimal scheduling model of energy storage sharing mode under high proportion of new energy is proposed to quantitatively analyze the influence of the planned capacity of energy storage on the power abandonment rate of new energy. Aiming at the complex nonlinearity of the two-layer optimization model, an improved moth extinguishing algorithm was used to optimize the target model. Finally, the modified IEEE-9 node test network is used to verify the rationality of the proposed model and algorithm.

Key words: high proportion of new energy; energy storage; two-layer model; moth-flame optimization (MFO); power abandonment rate

0 引言

针对日益严重的环境污染、能源紧张等问题，我国正积极助推能源低碳化、清洁化发展，因此提出了碳达峰、碳中和的“双碳”目标[1]。风电、光伏可再生能源具有实现低碳减排的先天优势，可逐步替代高排放、高污染的传统化石能源。考虑到新能源发电出力特性、机组控制方式等差异化特征，高比例新能源并网给电网运行规划带来重大影响[2-3]，将推动储能技术的重大变革[4]。

储能系统具有调频、调峰等功能，大幅提升电力系统对新能源的消纳能力[5-7]，众多学者对

中冶集团公司科技项目：高比例新能源供配电系统优化配置与协调控制关键问题研究（33070262）

含新能源微电网系统、主动配电网、分布式能源系统的储能规划及其相应的容量优化配置进行了深入研究。文献[8]充分考虑到新能源出力的随机性，通过储能系统平抑新能源并网带来功率波动。文献[9]建议采用储能投资、弃风两者目标最小化的成本模型，确立含储能系统的电网调度优化策略。文献[10]建立以外层优化储能容量、内层优化储能充/放电功率的储能双层模型。文献[11]通过对多种储能装置的运行和规划特征进行详细分析，构建出一种可再生能源系统的储能综合模型，从而利用储能系统来提高风电接入水平。文献[12]在兼顾效益和环境协调背景下提出了一种多目标的动态优化模型，但该模型着重考虑风电机组的预测功率并作为确定量计入系统的功率约束条件，未充分计及风电出力的随机性、波动性对并网系统带来的不确定影响。文献[13]通过建立含储能系统的二阶随机优化模型，重点考虑含火电机组发电、储能建设、“弃风”惩罚和切负荷费用等综合成本最小化目标，并利用列生成算法进行模型求解。以上研究未充分探讨大规模的高比例可再生能源接入电网后，如何优化储能系统的配置容量和所产生的共享效益。在模型求解方面，文献[14]侧重于从概率分布的角度提出了一种应用场景下的多目标优化模型，且在模型的求解方面，该文献利用粒子群算法对所提的模型进行寻优求解，但风电可再生能源因其功率波动性，适用于在不同概率场景下建立目标模型，无法基于全局的角度评估风电机组出力对系统运行稳定性和相关决策量的影响程度。

综上所述，以大规模的高比例新能源并网为基础，本文提出一种基于风光储综合系统的储能容量配置双层优化方法。其中，外层优化目标以系统总成本最优为目标建立决策模型，内层目标以储能参与调节的收益最优为目标建立决策模型。此外，针对所提的双层目标模型具有复杂的非线性化特征，本文采用改进的飞蛾扑火算法对其进行优化求解，并以修正的IEEE-9节点测试网络来验证本文模型和算法的合理性。通过仿真结果为高比例新能源下的储能容量的合理配置提供参考。

1 双层决策问题

双层决策问题是一种具有两层递阶结构的系统优化问题，外层优化问题和内层优化问题都有各自的目标函数和约束条件。外层优化问题的目标函数和约束条件不仅与外层优化问题的决策变量相关，而且还依赖于内层优化问题的最优解，而内层优化问题的最优解又受外层优化问题的决策变量影响。双层决策问题的一般数学模型为

$$\begin{cases}\min\limits_{x} F(x,y) \quad \text{s.t. } g(x,y)\leqslant 0\\ \min\limits_{y} f(x,y) \quad \text{s.t. } h(x,y)\leqslant 0\end{cases} \tag{1}$$

式中，$x\in R^{n_x}$、$y\in R^{n_y}$分别为外层优化问题和内层优化问题的决策变量；F、f分别为外层优化问题和内层优化问题的目标函数；$g:R^{n_x+n_y}\rightarrow R^{n_u}$、$h:R^{n_x+n_y}\rightarrow R^{n_l}$分别为外层优化问题和内层优化问题的约束条件。

双层优化问题通常难以得到全局最优解，通过数值解法进行迭代逼近，满足一定的收敛条件后，即认为达到了最优。

1.1 以系统总调度成本建立外层优化模型

鉴于可再生能源的波动性、随机性特点，传统的建模方式将无法准确地刻画参与主体的运行效益、环境效益等因素。为了凸显高比例可再生能源并网后建模的准确性[15]，传统发电机组占比逐渐降低，系统需大量的灵活资源备用。此外，应减少“弃风”“弃光”现象，降低发电煤耗，建立外层优化目标模型为

$$\begin{aligned}F=&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{G}[f(P_{i,t})+Q_{i,t}^{u}+Q_{i,t}^{d}]+\\&\lambda_1\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}(W_{j,t}^{0}-W_{j,t})+\lambda_2\sum_{t=1}^{T}\sum_{k}^{K}(S_{k,t}^{0}-S_{k,t})+\\&\lambda_3\sum_{t=1}^{T}\sum_{l=1}^{L}L_{l,t}+\lambda_4\sum_{t=1}^{T}\sum_{l=1}^{L}H_{l,t}\end{aligned} \tag{2}$$

式中，$f(P_{i,t})$为火电机组i在t时段内的发电费用；$P_{i,t}$为火电机组i在t时段内的有功功率；$Q_{i,t}^{u}$为火电机组i在t时段内的起动成本；$Q_{i,t}^{d}$为火电机组i在t时段内的停机成本；λ_1为弃风惩罚系数；λ_2为弃

光惩罚系数；λ_3为失去负荷的惩罚系数；λ_4为失去备用的惩罚系数；$W_{j,t}$为风电机组i在t时段内的出力；$W^0_{j,t}$为风电机组i在t时段内的预测出力；$S_{k,t}$为光伏机组k在时段t内的出力；$S_{k0.t}$为光伏机组k在时段t内的预测出力；$L_{l.t}$为系统节点l在t时段内失去的负荷容量；$H_{l.t}$为系统节点l在t时段内失去的备用容量；G为火电机组数量；T为总的优化时段；L为网络节点总数。

1.2 以储能系统收益建立内层优化模型

高比例新能源与储能系统协同作用后，能大幅减少新能源浪费，降低传统火电机组的能源消耗，换算成经济指标并以此建立内层优化目标模型为

$$E_{\mathrm{ecc}}=\pi(F_{\mathrm{f}}-F_{\mathrm{f}0}) \tag{3}$$

式中，E_{ecc}为储能参与前/后的节约生产成本；F_{f}为储能参与后的年耗煤量；$F_{\mathrm{f}0}$为储能参与前的年耗煤量；π为标煤单价。

储能系统参与调度后，系统可降低火电机组的投入和火电成本，换成经济指标为

$$E_{\mathrm{tpp}}=E_{\mathrm{in.g}}+E_{\mathrm{om.g}} \tag{4}$$

$$E_{\mathrm{in.g}}=\mathrm{CRF}(r,Y_{\mathrm{g}})k_{\mathrm{g}}(P_{\mathrm{g}}-P_{\mathrm{g}0}) \tag{5}$$

$$E_{\mathrm{om.g}}=\eta k_{\mathrm{g}}(P_{\mathrm{g}}-P_{\mathrm{g}0}) \tag{6}$$

式中，E_{tpp}为储能参与后传统机组的替代效益；$E_{\mathrm{in.g}}$为储能参与后传统机组的等效年投资成本；$E_{\mathrm{om.g}}$为储能参与后传统机组的等效年运维成本；$\mathrm{CRF}(r,Y_{\mathrm{g}})$为等年值参数；$P_{\mathrm{g}}$为储能参与后的火电装机容量；$P_{\mathrm{g}0}$为储能未参与的火电装机容量；$k_{\mathrm{g}}$为投资火电的单位成本；$\eta$为火电的运维成本费率；$r$为基准折现率；$Y_{\mathrm{g}}$为火电机组的运行寿命。

因此，储能参与后的系统总收益为

$$E_{\mathrm{total}}=E_{\mathrm{ecc}}+E_{\mathrm{tpp}} \tag{7}$$

储能系统的净收益为

$$F_{\mathrm{ESS}}=E_{\mathrm{ESS}}-C_{\mathrm{ESS}} \tag{8}$$

其中

$$C_{\mathrm{ESS}}=C_{\mathrm{in}}+C_{\mathrm{om}} \tag{9}$$

$$C_{\mathrm{in}}=C(r,Y_{\mathrm{c}})(C_{\mathrm{P}}P_{\mathrm{ESS}}+C_{\mathrm{E}}E_{\mathrm{ESS}}) \tag{10}$$

$$C_{\mathrm{om}}=k_{\mathrm{o}}P_{\mathrm{ESS}}+k_{\mathrm{m}}Q_{\mathrm{ESS}} \tag{11}$$

式中，C_{ESS}为储能系统的年等值成本；F_{ESS}为储能系统的产生功率；E_{ESS}为储能系统的容量；C_{P}为储能系统的单位功率投资成本；C_{E}为储能系统的单位容量投资成本；$C(r,Y_{\mathrm{c}})$为等年值系数；Y_{c}为储能系统的运行寿命；k_{o}为储能系统的单位功率年等值运维成本；k_{m}为储能系统的单位容量年等值运维成本；Q_{ESS}为储能功率。

储能替代传统机组容量原理如图1所示。

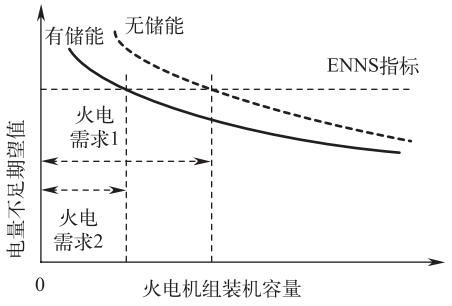


图 1 储能替代传统机组容量原理简图

Fig. 1 Energy storage replacement of traditional unit capacity schematic diagram

由图1可知，储能参与系统调度后，系统一定程度上降低了对传统火电机组的依赖，同时也利于系统旋转备用容量的优化配置。

1.3 模型约束条件

除了考虑功率守恒约束、机组运行约束和联络线功率约束等因素外，本文主要从以下方面考虑。

（1）储能系统能量平衡约束

$$P_t^{\mathrm{B}}=P_{i.t}^{\mathrm{BO}}-P_{i.t}^{\mathrm{BC}} \tag{12}$$

式中，P_t^{B}为储能系统在时段t内对电网的贡献功率；$P_{i.t}^{\mathrm{BO}}$为储能系统i在t时段内的放电功率；$P_{i.t}^{\mathrm{BC}}$为储能系统i在时段t内的充电功率。

（2）储能充/放电功率约束

$$\begin{cases}x_{i.t}^{\mathrm{BC}}P_{i.\min}^{\mathrm{BC}}\leqslant P_{i.t}^{\mathrm{BC}}\leqslant x_{i.t}^{\mathrm{BC}}P_{i.\max}^{\mathrm{BC}}\\ x_{i.t}^{\mathrm{BO}}P_{i.\min}^{\mathrm{BO}}\leqslant P_{i.t}^{\mathrm{BO}}\leqslant x_{i.t}^{\mathrm{BO}}P_{i.\max}^{\mathrm{BO}}\end{cases} \tag{13}$$

式中，$x_{i.t}^{\mathrm{BC}}$为储能系统i在t时段内充电变量，其值取0或1；$P_{i.\min}^{\mathrm{BC}}$为储能系统i最小的充电功率；$P_{i.\max}^{\mathrm{BC}}$为储能系统i最大的充电功率；$x_{i.t}^{\mathrm{BO}}$为储能系统i在t时段内放电变量，其值取0或1；$P_{i.\min}^{\mathrm{BO}}$为储能系统i最小的放电功率；$P_{i.\max}^{\mathrm{BO}}$为储能系统i最大的放电

功率。

（3）储能充/放电的状态约束

$$0 \leqslant x_{i.t}^{\mathrm{BC}} + x_{i.t}^{\mathrm{BO}} \leqslant 1 \tag{14}$$

式（14）表示任一时段储能的充/放电状态不能同时发生。

（4）储能系统的能量流动约束

$$E_{i.t+1} = E_{i.t} + (\varepsilon_{\mathrm{BC}} P_{i.t}^{\mathrm{BC}} - \frac{P_{i.t}^{\mathrm{BO}}}{\varepsilon_{\mathrm{BO}}}) \tag{15}$$

式中，$E_{i,t}$为储能系统i在t时段内存储的电能；$\varepsilon_{\mathrm{BC}}$为储能系统的充电效率；$\varepsilon_{\mathrm{BO}}$为储能系统的放电效率。

（5）储能系统的能量约束

$$E_{i.\min} \leqslant E_{i.t} \leqslant E_{i.\max} \tag{16}$$

式中，$E_{i.\min}$为储能系统i的最小存储电能；$E_{i.\max}$为储能系统i的最大存储电能。

（6）储能系统充电状态切换约束

$$\begin{cases} x_{i.t}^{\mathrm{BC}} - x_{i.t-1}^{\mathrm{BC}} = s_{i.t}^{\mathrm{BCu}} - s_{i.t}^{\mathrm{BCd}} \\ x_{i.t}^{\mathrm{BO}} - x_{i.t-1}^{\mathrm{BO}} = s_{i.t}^{\mathrm{BOu}} - s_{i.t}^{\mathrm{BOd}} \end{cases} \tag{17}$$

式中，$s_{i.t}^{\mathrm{BC}u}$、$s_{i.t}^{\mathrm{BC}d}$为储能系统i在t时段内的充电状态变量，其值取0或1；$s_{i.t}^{\mathrm{BO}u}$、$s_{i.t}^{\mathrm{BO}d}$为储能系统i在t时段内的放电状态变量，其值取0或1。

考虑到式（17）中的充电状态切换中的整数变量无法同时存在，因此存在约束为

$$\begin{cases} 0 \leqslant s_{i.t}^{\mathrm{BC}u} + s_{i.t}^{\mathrm{BC}d} \leqslant 1 \\ 0 \leqslant s_{i.t}^{\mathrm{BO}u} + s_{i.t}^{\mathrm{BO}d} \leqslant 1 \end{cases} \tag{18}$$

2 模型求解

以目标分层优化为原则，本文选取储能参与后的系统总成本最小为外层优化目标函数，以储能系统收益为内层优化目标函数进行分层求解。

新能源并网本身是一个非线性规划模型优化的问题，为此，本文提出了一种改进的飞蛾扑火算法（MFO）对双层模型进行求解。该算法通过模拟飞蛾在夜间飞行中的巡航方式，结合对数螺旋算子来更新飞蛾飞行空间中新的位置，该算法能获得较好的全局搜索、局部寻优的能力，适用于复杂约束条件下的随机优化问题[16]。然而，该算法也存在大规模寻优空间下收敛效率低下的问题[17]，本文通过以下几个方面进行相应改进。

1）利用平均熵策略开展种群初始化，以保证算法的全局多样性。

2）利用Lévy飞行策略规避算法出现“早熟”现象。

3）利用变尺度混沌策略增强算法的局部搜索能力。

4）MFO算法引入差分进化思想中缩放因子，提升算法大规模寻优能力[18]。

在改进MFO算法中，飞蛾在飞行中的搜索位置对应双层优化模型中的待优化变量，表达式为

$$n_{\mathrm{f}} = \mathrm{round}(n_{\mathrm{f\,max}} - \frac{n_{\mathrm{f\,max}} - 1}{i_{\mathrm{T}}}) \tag{19}$$

$$A = 1.5 - 1.5 \times (1/i_t)^{1/6} \tag{20}$$

式中，$n_{\mathrm{f\,max}}$为算法中最大的火焰数；n为迭代次数；round()为四舍五入函数；n_{f}为算法的迭代次数。

此外，采用混沌变量的历遍特性对最优飞蛾位置进行变异操作，即

$$x_i^{n+1} = \mu x_i^n (1 - x_i^n) \tag{21}$$

式中，μ为算法处于完全混沌的形式。

执行归一化后，由式（22）获取变异尺度L，表达式为

$$L = M_{i\min} + x_i^{n+1}(M_{i\max} - M_{i\min}) \tag{22}$$

式中，$M_{i\min}$、$M_{i\max}$分别为维度i上飞蛾位置的最小、最大值。

再利用式（23）对飞蛾位置进行更新操作，最后将优胜结果替代掉更新前的结果，直至实现算法的最大迭代操作，表达式为

$$\begin{cases} M_i^{n+1} = (1 - \xi_{\mathrm{g}}) M_i^n + \xi_{\mathrm{g}} L \\ \xi_{\mathrm{g}} = 1 - (1 - \dfrac{1}{N})^{\beta} \end{cases} \tag{23}$$

式中，β为变异因子的收缩速度。

$$M_i^{N+1} = M_r^N + p\left(pM_r^N - M_i^N\right) \tag{24}$$

$$M_i^{N+1} = (pM_r^N - M_i^N)\mathrm{e}^{bt}\cos(2\pi t) + M_r^N \tag{25}$$

$$M_i^{N+1} = F_j^N + p(pF_j^N - M_i^N) \tag{26}$$

$$M_i^{N+1}=(pF_r^N-M_i^N)\mathrm{e}^{bt}\cos(2\pi t)+F_r^N \tag{27}$$

式中，p为高斯分布下的控制因子；r、j分别为飞蛾种群不同的随机位置参数；b为对数螺旋系数；F为飞蛾飞行中获得的最佳位置。

Lévy飞行策略为

$$\begin{cases} M_i^{N+1}=M_i^N+\partial\oplus L(\zeta)\oplus(M_i^N-\mathrm{best}) \\ L(\zeta)=\left|\dfrac{\Gamma(1+\zeta)\sin(\dfrac{\pi\zeta}{2})}{\Gamma(\dfrac{1+\zeta}{2})\zeta 2^{(\zeta-1)/2}}\right| \end{cases} \tag{28}$$

式中，⊕为点对点的乘法运算；∂为步长因子；best为最优飞蛾位置；$L(\lambda)$为飞蛾搜索行为服从Lévy分布规律；λ为常数值。

本文所提的改进飞蛾算法优化目标流程如图2所示。

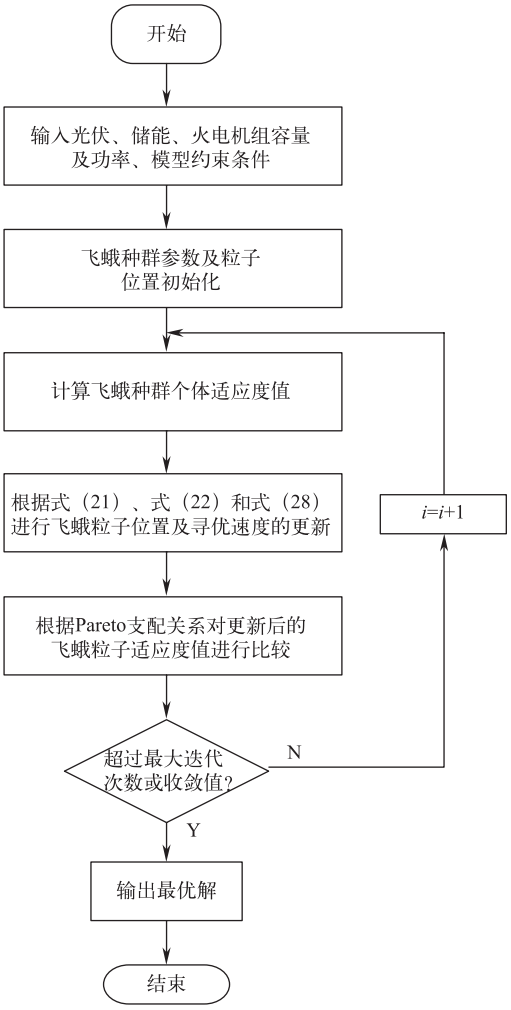


图 2 改进 MFO 算法寻优流程图

Fig. 2 IMFO algorithm optimization flow chart

3 算例分析

为了量化研究高比例新能源参与的储能系统容量优化问题，案例选取修改的IEEE-9节点网络系统开展双层风-光-储联合发电系统模型的并网优化计算。风电、光伏电站接入节点3、节点1，储能系统接入节点6，节点8为与上级电网的连接节点。火电机组、储能装置相关参数见表1~表4。风电、光伏的超短时预测出力及系统负荷预测结果如图3所示。储能系统的电池寿命设置为20年，通货膨胀率设置为2%，贴现率设置为10%。文中的算法参数设置见表5。

表 1 算例系统的相关运行参数

Tab. 1 Example system related operating parameters

（单位：MW）

机组	上界	下界	爬坡	额定功率
火电机组 1	55	10	15	-
火电机组 2	80	20	25	-
风电机组	-	-	-	850
光伏机组	-	-	-	450

表 2 火电机组的燃料成本系数

Tab. 2 Fuel cost factor of thermal power unit

机组名称	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
火电机组 1	1 455.6	39.6	0.11	270	0.098
火电机组 2	1 468.5	40.5	0.13	380	0.094

表 3 储能电池参数

Tab. 3 Energy storage battery parameters

C_P/[美元 /（kW·h）]	C_E/[美元 /（kW·h）]	C_M/[美元 /（kW·h）]	P(%)	η_c	寿命 /a
1 171	2 231	95	1	0.9	15

表 4 惩罚成本系数

Tab. 4 Penalty cost factor

项目名称	风电机组		光伏电站	
惩罚系数	K_{pw}	K_{rw}	K_{ppw}	K_{RPW}
数值	60	110	85	100

表 5 算法设置参数

Tab. 5 Algorithm setting parameter

种群规模	固定视距因子	螺旋常数	Logistic.max	Flame.max
300	0.95	1.0	50	150

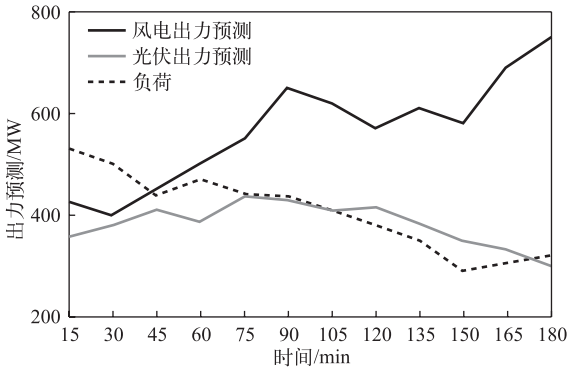


图 3　风电、光伏的超短时预测出力及系统负荷预测数据

Fig. 3 Ultra-short time forecast output and system load forecast data of wind power and photovoltaic

3.1　算法对比

为了充分探讨本文提出的改进MFO算法对于解决复杂变量下的非线性双层模型的有效性，利用测试函数[19]进行相关收敛性误差测试，本文对比分析了改进飞蛾算法（IMFO）、飞蛾算法（MFO）以及多目标粒子群（MPSO）算法的优化过程的收敛速度与收敛误差值，对比结果如图4所示。

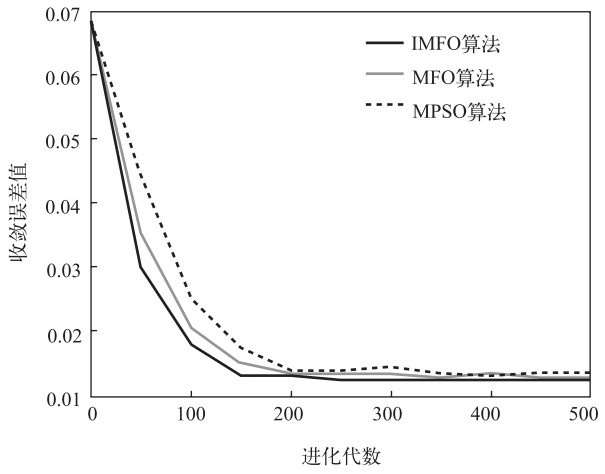


图 4　算法收敛误差对比

Fig. 4 Algorithm convergence error comparison

由图4可知，本文提出的改进飞蛾算法（IMFO）所得到的收敛速度和收敛误差值均比飞蛾算法（MFO）、多目标粒子群算法（MPSO）要小，说明本文所提的改进算法在对目标模型训练过程中寻优收敛速度更快，准确度更好。

3.2　仿真优化结果

为了提升新能源的并网水平，利用仿真结果进行分析，本文得到了火电机组的发电量计划水平与储能系统的充/放电功率之间的协调关系。既能承担系统所提供的旋转备用容量，又能平抑新能源并网所带来的功率波动，其具体结果如图5所示。

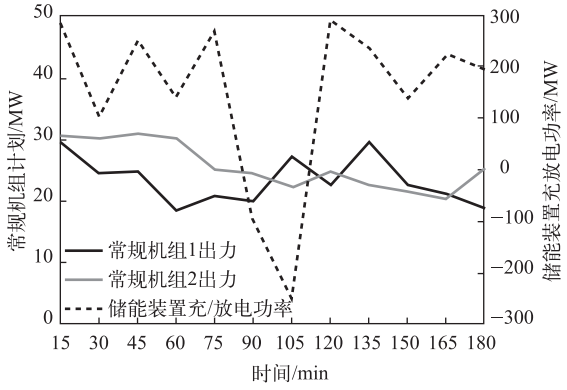


图 5　机组出力优化结果

Fig. 5 Unit output optimization results

由图5可知，为了提升系统对新能源并网的消纳水平，利用仿真结果进行分析，通过储能系统充/放电来平抑功率的波动，很好地完成了新能源与常规机组之间的协同消纳。

3.3　高比例新能源接入对储能配置的影响

为了分析高比例新能源的不确定因素对系统调度总成本及储能容量配置的影响，本文对可再生能源的规模数量进行详细分析，其结果如图6所示。

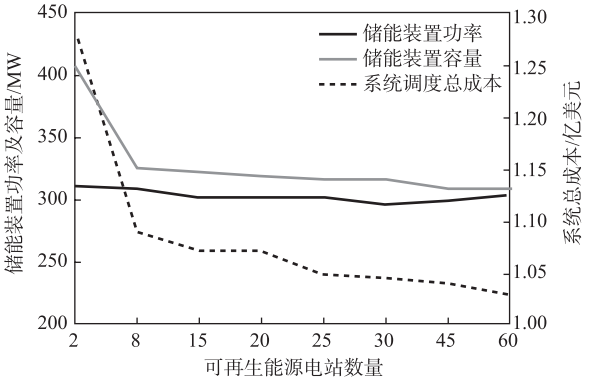


图 6　新能源规模对储能系统容量的影响

Fig. 6 The influence of new energy scale on the capacity of energy storage system

由图6可知，增加新能源建设的数量，使得分布建设的空间规划更为合理，将更加深刻地描述新能源的随机性变量，储能系统参与系统功率调节的作用更加明显，使得系统的总体调度成本得到进一步优化，从而获得更优的调度计划和储能优化容量。

3.4 储能系统容量对新能源弃电率的影响

为了降低新能源的弃电率，重点探讨通过增加储能系统容量来降低新能源弃电率，具体结果如图7所示。

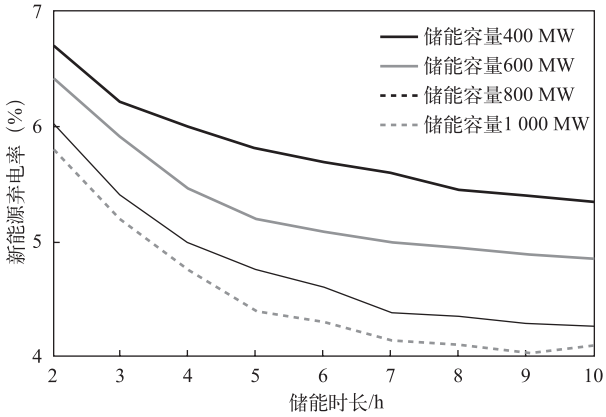


图 7 储能容量与新能源弃电率的内在联系

Fig. 7 Internal relationship between energy storage capacity and new energy abandonment rate

由图7可知，在储能系统的容量保持恒定的前提下，增加储能投入运行的时间，能降低新能源的弃电率；在储能系统运行时间保持恒定的前提下，增加储能系统的容量，亦能降低新能源的弃电率[20]。由仿真计算结果可知，储能系统容量小于600 MW，储能系统运行时间小于3 h，新能源弃电率高于5%；反之，储能系统容量大于600 MW，储能系统运行时间大于3 h，新能源弃电率保持在5%以内。

4 结束语

为了适应高比例新能源的风-光-储联合系统调度新模式，探索储能系统的配置容量广泛适应并促进新能源的并网消纳，本文提出了一种风-光-储协同调度的双层优化模型。针对该模型特点，本文提出了改进飞蛾扑火（IMFO）算法，有效避免了复杂非线性模型陷入局部最优解的缺陷。通过仿真结果表明，引入储能系统将有效降低高比例新能源系统下的弃风、弃光电量，提升了新能源并网后的系统稳定性，为新能源并网建设中充分运用辅助系统协同方式提供了一定的理论支持。此外，针对多目标模型中优化问题，本文所提的改进多目标算法具有较强的处理复杂非线性化条件的能力，但缺乏处理复杂背景下的条件约束能力。如何更好地兼顾多种能源介质下算法的优化强度，同时在适应高比例新能源并网后随机性因素增加的局势下，突出考虑风电、光伏等多种可再生能源及储能系统的协调应用，将作为接下来深度研究高比例新能源介质下电力系统并网问题的重点。

参考文献

[1] 邱伟强，王茂春，林振智，等．“双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]．电力自动化设备，2021，41(10)：244-255.

[2] 王静，徐箭，廖思阳，等．计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J]．电力系统自动化，2019，43(15)：2-9.

[3] 侯四维，许建军．考虑可再生能源并网的配电网规划技术[J]．电器与能效管理技术，2018(5)：69-72.

[4] GAN J T，LI J L，QI W N，et al．A review on capacity optimization of hybrid renewable power system with energy storage [C] // Proceedings of 2019 4th International Conference on Advances in Energy and Environment Research，2019：597-601.

[5] 李军徽，侯涛，穆钢，等．基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J]．电力系统自动化，2020，44(19)：63-79.

[6] 黎淑娟，李欣然，黄际元，等．面向电网全调频过程的高倍率钛酸锂电池容量配置[J]．高电压技术，2018，44(1)：145-151.

[7] 郑乐，胡伟，陆秋瑜，等．储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]．中国电机工程学报，2014，34(16)：2533-2543.

[8] 单茂华，李陈龙，梁廷婷，等．用于平滑可再生能源出力波动的电池储能系统优化控制策略(英文)[J]．电网技术，2014，38(2)：469-477．

[9] 黄英，刘宝柱，王坤宇，等．考虑风电接纳能力的储输联合规划[J]．电网技术，2018，42(5)：1480-1489．

[10] 李建林，郭斌琪，牛萌，等．风光储系统储能容量优化配置策略[J]．电工技术学报，2018，33(6)：1189-1196．

[11] 谢鹏，蔡泽祥，刘平，等．考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J]．中国电机工程学报，2019，39(24)：7126-7136，7486．

[12] 茆美琴，王徐锐．基于分布式控制的孤岛微网经济调度方法[J]．电气工程学报，2018，13(9)：8-13．

[13] DAVIES D M，VERDE M G，MNYSHENKO O，et al．Combined economic and technological evaluation of bat-tery energy storage for grid applications[J]．Nature Energy，2019，4(1)：42-50．

[14] 朱志键，王杰．基于改进NSGA-Ⅱ的电力系统动态环境经济调度[J]．电力自动化设备，2017，37(2)：176-183．

[15] 郑乐，胡伟，陆秋瑜，等．储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]．中国电机工程学报，2014，34(16)：2533-2543．

[16] 茆美琴，王徐锐．基于分布式控制的孤岛微网经济调度方法[J]．电气工程学报，2018，13(9)：8-13．

[17] BAHMANI-FIROUZI B，FARJAH E，AZIZIPANAHAB- ARGHOOEE R．An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]．Energy，2013，50：232-244．

[18] 朱志键，王杰．基于改进 NSGA-Ⅱ的电力系统动态环境经济调度[J]．电力自动化设备， 2017，37(2)：176-183．

[19] SCHOTT J R．Fault tolerant design using single and multi criteria genetic algorithm optimization[J]．Cellular Immu Nology，1995，37(1)：1-13．

[20] 孙伟卿，王思成，刘宇宸．支撑新型电力系统的储能技术综述与政策解读[J]．自动化仪表，2022，43(12)：1-6，18．

作者简介

莫海勇（1982—），男，硕士，高级工程师，研究方向为企业供配电系统、新能源并网及优化研究等。

（收稿日期：2023-05-17）