

计及风电不确定性的混合储能系统优化配置研究

杨晓雷¹,丁磊明¹,李逸鸿^{2,3},张涛^{2,3},郭玥彤^{2,3},余利^{2,3},霍然^{2,3}

(1. 国网浙江省电力有限公司 嘉兴供电公司,浙江 嘉兴 314033;2. 三峡大学 电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;3. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学),湖北 宜昌 443002)

Study on optimal allocation of hybrid energy storage system considering wind power uncertainty

YANG Xiaolei¹, DING Leiming¹, LI Yihong^{2,3}, ZHANG Tao^{2,3}, GUO Yuetong^{2,3}, YU Li^{2,3}, HUO Ran^{2,3}

(1. Jiaying Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaying 314033, China;
2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

摘要:为减小风电并网产生的不利影响,提高风电消纳空间,在含风电出力的主动配电网中增设混合储能系统,并对其优化配置。考虑风电随机出力对潮流的影响,建立风电、储能系统接入配电网后的数学模型。以有功网损、电压偏差以及总投资费用最小为目标,引入机会约束建立储能系统优化配置模型。在此基础上,以IEEE 33节点配电网为算例,通过改进灰狼算法对模型进行求解,得到储能系统的最优配置方案。仿真结果表明,所提模型和算法能有效地对储能系统进行配置,提高整体经济性和安全性,同时提高系统的风电消纳能力。

关键词:主动配电网;风电不确定性;混合储能系统;优化配置;改进灰狼算法

Abstract: In order to reduce the adverse impact of wind power grid connection and improve the wind power consumption space, a hybrid energy storage system is added in the active distribution network with wind power output, and its configuration is optimized. Considering the influence of wind power random output on power flow, the mathematical model of wind power and energy storage connected to distribution network is established. The optimal allocation model of energy storage system is established with the objective of minimizing the active power loss, voltage deviation and investment cost. On this basis, the gray wolf algorithm is improved to solve the model. Taking IEEE 33 node system as an example, the optimal configuration scheme of energy storage system is obtained. The simulation results show that the proposed model and algorithm can effectively dispose the energy storage system, improve the overall economy and security, and increase the wind power consumption capacity of the system.

Key words: active distribution network; wind power uncertainty; mixed energy storage system; optimal allocation; improved gray wolf algorithm

0 引言

近年来,以分布式电源(distribution generator, DG)为代表的可再生能源发展十分迅猛,在节能环保、减缓能源危机等多个方面成效显著^[1]。分布式风电作为一种清洁、发展潜力较大的可再生能源,已经在全球大规模开发利用。但是,风电出力过程中表现出的随机性、波动性和反调峰等缺陷则会对电网运行造成不利影响^[2]。通过安装储能系统能够有效缓解风电接入配电网造成的影响。如何考虑风电不确定性,综合各

方面目标,优化配置储能系统成为亟需解决的问题^[3]。

配置合理的储能系统一方面能够有效保证风功率输出的平滑性,改善电能质量;另一方面还可以对风功率“削峰填谷”,实现风能的充分利用^[4-5]。文献[6]以系统的经济性和稳定性为优化目标,分别建立了单目标的储能优化模型,并采用改进粒子群优化算法求解得到储能配置容量和位置。文献[7]从投资者角度,综合考虑多种投资成本和运行成本,对储能系统进行优化配置。文献[8]将风电出力的不平衡功率分解,提出基于频谱分析确定混合储能系统安装容量的方法。文献[9]基于人工蜂群算法对混合储能效益模型进行分析,得到经济性最优的频率滞环控制储能配置方案。灰狼算法拥有独特的寻优机制,求解效率较高,但在针对特定的多目标优化模型求解时,仍需对该算法的寻优机制等方面进行

收稿日期:2021-09-16;修回日期:2021-10-16

基金项目:国网浙江省电力有限公司群众性科学技术创新项目(5211JX190012);国网浙江省电力有限公司科技资助项目(5211JX1900CX)

改进,进而提高算法求解的精确性。

为充分发挥储能系统的优势,平衡系统的经济性与安全性,本文针对含大规模风电电力系统,建立计及风电不确定性的混合储能系统优化配置模型,并以IEEE 33节点系统为算例,采用改进多目标灰狼算法对优化配置模型进行仿真分析。通过对灰狼算法的改进,能够在保留良好寻优机制的同时处理多类型约束条件,并能有效处理多目标优化问题,满足了解考虑风电特性的混合储能系统优化配置问题的需求。

1 含风电与储能系统的配电网数学模型

1.1 风电和储能系统接入后的配电网模型

本文考虑风电、混合储能系统联合接入电网的模型如图1所示。单一储能系统的功率密度与能量密度、工作效率与循环寿命等多方面不能兼顾,而采用将蓄电池和超级电容器组成的混合系统能够对能量和功率进行高效管理,充分发挥蓄电池的持久性和超级电容器的快速性,从而整体提升储能系统的经济性和综合性能。通过蓄电池和超级电容器间的优势互补,协同平抑风电波动。与此同时,考虑到储能系统的型号配置和经济成本间的差异,合理配置两种储能能够提升系统经济性。

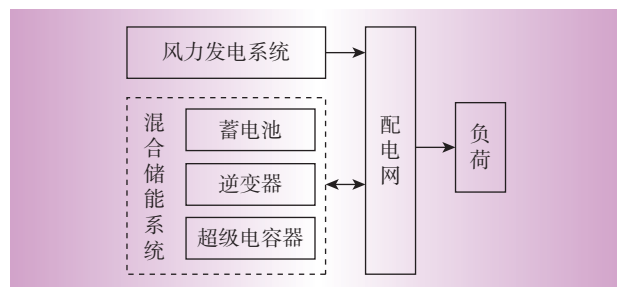


图1 含风电场、储能系统的配电网模型

Fig. 1 Distribution network model with wind power and energy storage system

1.2 风电和储能系统接入后的配电网潮流计算

风力发电时输出的无功功率可根据式(1)计算

$$Q_w = \frac{P_w}{\tan \varphi} \quad (1)$$

式中: Q_w 为风力发电机组输出的无功功率; P_w 为风力发电机组输出的有功功率; φ 为风电的功率因数角,本文设定 $\varphi = 65^\circ$ 。

储能系统与风电接入配电网后均对潮流产生影响。以混合储能系统、风电接入同一节点为例,该节点的等效有功功率、无功功率为

$$\begin{cases} P_i = P_{L,i} - P_w - P_{ESS} \\ Q_i = Q_{L,i} - Q_w \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的等效有功功率、无功功

率; $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 为节点 i 原来的节点负荷; P_{ESS} 为混合储能系统输出的有功功率, $P_{ESS} > 0$ 表示储能系统放电, $P_{ESS} < 0$ 表示储能系统充电。

2 混合储能系统优化配置模型

2.1 目标函数

有功网损和电压偏差能够有效反映储能系统接入电网后补偿电压的作用。考虑到储能系统的高投资成本,选取有功网损、电压偏差以及总投资费用最小为目标函数。

2.1.1 有功网损

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \times R_i \quad (3)$$

式中: f_1 为系统有功网损; n 为系统总支路数; R_i 为支路 i 的阻抗; P_i 和 Q_i 分别为支路 i 的末端有功、无功负荷; V_i 为线路末端电压。

2.1.2 电压偏差

$$\min f_2 = \max \left| \frac{V_i - V_N}{V_N} \right| \quad (4)$$

式中: f_2 为系统电压偏差; V_i 为电力系统中线路末端的实际电压值; V_N 为线路末端的额定电压。

2.1.3 总投资成本

$$\min f_3 = C_{bat} + C_{uc} \quad (5)$$

式中: f_3 为总投资成本; C_{bat} 为投资蓄电池的成本; C_{uc} 为投资超级电容器的成本。

年投资费用表达式为

$$\begin{cases} C_{bat} = (c_{b,1} P_{bat} + c_{b,2} E_{bat}) B_{Y_b} + \sum_{y=1}^{Y_b} [c_{b,3} P_{bat} B_y] / Y_b \\ C_{uc} = (c_{u,1} P_{uc} + c_{u,2} E_{uc}) B_{Y_u} + \sum_{y=1}^{Y_u} [c_{u,3} P_{uc} B_y] / Y_u \end{cases} \quad (6)$$

$$B_m = \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \quad m = Y_u, Y_b, Y \quad (7)$$

式中: P_{bat} 和 E_{bat} 分别为蓄电池的额定功率和额定容量; $c_{b,1}$ 、 $c_{b,2}$ 和 $c_{b,3}$ 分别为蓄电池的单位功率造价、单位容量造价和单位功率运维成本; B_m 为现金价值因子; r 为折现率; Y_b 为蓄电池的使用寿命; P_{uc} 和 E_{uc} 分别为超级电容器的额定功率和额定容量; $c_{u,1}$ 、 $c_{u,2}$ 和 $c_{u,3}$ 分别为超级电容器的单位功率投资费用、单位容量投资费用和单位功率运维成本; Y_u 为超级电容器的使用寿命。

2.2 约束条件

2.2.1 机会约束

在规划过程中,可以采用机会约束的形式要求节点电压大于运行规程的概率保持在置信水平内

$$\Pr\{U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}\} \geq a \quad (8)$$

式中: $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为节点电压所允许范围的最小值、最大值; U_i 为 i 节点的节点电压; $\text{Pr}\{\}$ 为事件成立的概率; a 为该机会约束成立的置信水平。

2.2.2 潮流平衡约束

$$\begin{cases} P'_{W,i} + P'_{ESS,i} - P_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j Y \\ Q'_{W,i} - Q_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j Y \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P'_{W,i}$ 、 $Q'_{W,i}$ 分别为 t 时刻节点 i 上风电注入的有功、无功功率; $P_{L,i}$ 为节点 i 的有功负荷; $Q_{L,i}$ 为节点 i 的无功负荷; $P'_{ESS,i}$ 为 t 时刻 i 节点混合储能系统的充放电功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; n 为配电网的节点总数; Y 为系统支路导纳矩阵。

2.2.3 储能充放电功率约束

$$\begin{cases} -P_{\text{bat,max}} \leq P'_{\text{bat},i} \leq P_{\text{bat,max}} \\ -P_{\text{uc,max}} \leq P'_{\text{uc},i} \leq P_{\text{uc,max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{bat,max}}$ 和 $P_{\text{uc,max}}$ 分别为蓄电池与超级电容器限制的最大充放电功率; $P'_{\text{bat},i}$ 和 $P'_{\text{uc},i}$ 分别为 t 时刻 i 节点蓄电池、超级电容器的充放电功率。

2.2.4 储能荷电状态约束

$$\begin{cases} SOC_{\text{bat,min}} \leq \frac{E'_{\text{bat},i}}{E_{\text{bat}}} \leq SOC_{\text{bat,max}} \\ SOC_{\text{uc,min}} \leq \frac{E'_{\text{uc},i}}{E_{\text{uc}}} \leq SOC_{\text{uc,max}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $SOC_{\text{bat,max}}$ 和 $SOC_{\text{bat,min}}$ 分别为蓄电池荷电状态的上、下限; $E'_{\text{bat},i}$ 为 t 时段 i 节点蓄电池剩余能量; E_{bat} 为蓄电池额定容量; $SOC_{\text{uc,max}}$ 和 $SOC_{\text{uc,min}}$ 分别为超级电容器荷电状态的上限和下限; $E'_{\text{uc},i}$ 为 t 时刻 i 节点超级电容器剩余能量; E_{uc} 为超级电容器额定容量。

2.2.5 储能能量平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P'_{\text{bat},i} \cdot \Delta t = 0 \\ \sum_{t=1}^T P'_{\text{uc},i} \cdot \Delta t = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: Δt 为时段间隔; T 为总时段个数。

2.2.6 混合储能容量比例约束

针对特定场景设置蓄电池和超级电容器的容量配置比例满足以下约束

$$k_{\min} \leq \frac{E_{\text{bat}}}{E_{\text{uc}}} \leq k_{\max} \quad (13)$$

式中: $k_{\max}$ 、 $k_{\min}$ 分别为蓄电池和超级电容器容量比值的最大值和最小值。

3 基于改进灰狼算法的模型求解

本文拟采用改进的灰狼算法求取 Pareto 最优前

沿解集,并基于模糊隶属理论选择折衷解,得到最终的优化配置方案。

3.1 改进灰狼算法

3.1.1 基本灰狼算法思想

灰狼算法是由 Seyedali Mirjalili 等人结合灰狼种群中的等级机制,模拟灰狼追捕、围剿猎物的过程提出的一种新型的狼群智能算法^[10]。采用式(14)进行位置更新

$$\begin{cases} D_p = |C \times X_p(t) - X_i(t)| \\ X_i(t+1) = X_p(t) - A \times D_p \\ A = 2 \times a \times r_1 - a \\ C = 2 \times r_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: D_p 为灰狼追寻猎物过程与猎物之间的距离; C 为系数向量,模拟自然界中搜寻猎物时遇到的障碍; p 为灰狼个体; $X_p(t)$ 为第 t 次迭代中 p 狼的位置,是引导的猎物位置; A 为系数向量, $|A| > 1$ 时为全局搜索, $|A| < 1$ 时为局部搜索; a 为收敛因子,随着迭代次数的增加会从 2 到 0 线性递减; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 内的随机数。 ω 狼联合头狼一起确定猎物的位置,判断猎物移动的方向,然后整个狼群协调配合完成追捕。 ω 狼采用式(15)进行位置更新

$$X(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{3} \quad (15)$$

3.1.2 混沌映射种群初始化

为增加种群初始化的多样性,引入混沌映射快速在搜索范围内动态、全局地生成初始值。Logistic 映射属于一种经典的混沌映射方法^[11],映射表达式为

$$X_{n+1} = X_n \times \mu \times (1 - X_n) \quad (16)$$

式中: $\mu \in [0,4]$, 为 Logistic 参数; $X \in (0,1)$, 当 $\mu = 4$ 时,该方程呈现完全混沌状态, X 序列为 $(0,1)$ 上的满序列。

3.1.3 引入模糊隶属度函数

采用改进灰狼算法进行多目标优化时,将有功网损、电压偏差、投资费用作为平行目标函数来择优。在选择头狼的过程中,要评价 Pareto 解集中每个目标函数的满意度,然后根据满意度值排序选择头狼。采用模糊隶属度函数评价 Pareto 解集对各个目标的满意度函数如式(17)所示

$$\mu_i = \frac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad (17)$$

式中: f_i 为第 i 个目标函数的值; $f_{i,\max}$ 、 $f_{i,\min}$ 分别为第 i 个目标函数值的最大值与最小值; μ_i 为第 i 个目标函数对应的满意度。

根据式(17)所计算的满意度,计算 Pareto 解集中相应解对多个目标函数的兼容性,如式(18)所示

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i \tag{18}$$

式中： N 为目标函数的个数； μ_i 为相应解的兼容性，越接近 1，说明该解对于多个目标的兼容性越高，对应的解越优。

3.1.4 越界惩罚

在混沌初始化及狼群寻优迭代过程中会产生不满足机会约束的解，对不满足机会约束的配置结果进行越界惩罚，惩罚思路如下

$$\begin{cases} P(x) = \lambda \cdot \min\{0, g(x)\}^2 \\ g(x) = (f - \alpha) / \alpha \end{cases} \tag{19}$$

式中： λ 为惩罚因子； $g(x)$ 为约束项； $P(x)$ 为处理后的目标函数； f 为该配置方案下电压未越界的事件个数； α 为该事件的置信水平。

3.2 基于改进灰狼算法的求解流程

基于改进灰狼算法的混合储能系统优化配置求解流程如图 2 所示。

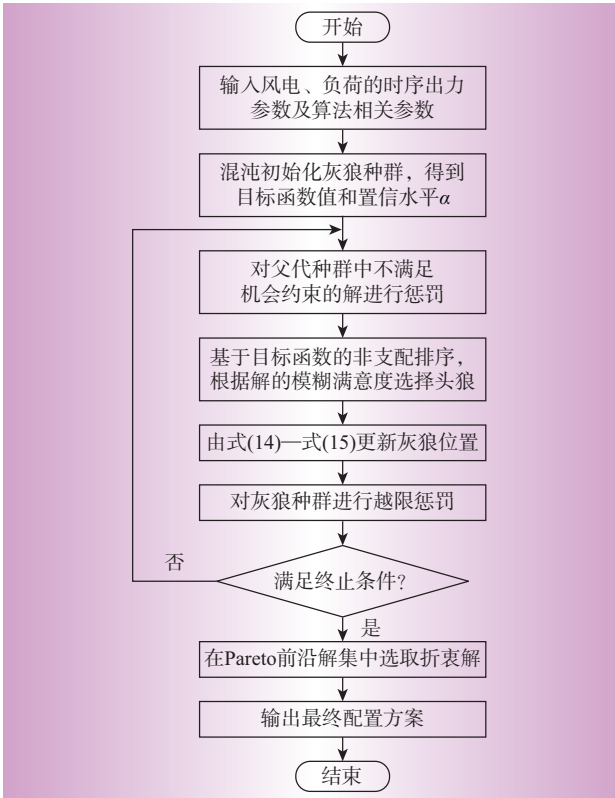


图 2 基于改进灰狼算法的求解流程图

Fig. 2 Solution flow chart based on improved gray wolf algorithm

本文所提到的多目标优化配置模型的待优化变量为储能系统的安装位置及安装容量，采用改进灰狼算法求解时体现为灰狼群的空间位置。灰狼种群的位置初始化对应大量储能配置方案的初始化。灰狼群不断更新自己的位置，直到找到最佳位置，相当于将多种配置方案的多个目标函数进行对比寻优。灰狼群的最佳位置即为最优的储能配置结果。

4 算例分析

4.1 模型参数

本文采用改进的 IEEE 33 节点系统作为仿真算例，在包含风电的主动配电网中对混合储能系统进行优化配置。在系统未接入其他负荷之前，有功负荷共 3 715 kW，无功负荷共 2 300 kW，线电压的基准 $U_B=12.66$ kV，电压幅值的标幺值取 1.0 p.u.。根据系统有功网损灵敏度分布选择 10 个候选节点，分别为 8、14、17、18、24、25、29、30、31、32 号节点。设定每个节点蓄电池和超级电容接入容量限制为 0~1 000 kW，蓄电池和超级电容器接入比例 $k_{\min}=1$ ， $k_{\max}=3$ 。改进灰狼算法取狼群数量为 50，迭代次数为 100，节点电压偏差在 5% 范围内，机会约束置信水平为 0.8，惩罚因子取 10 000。接入储能系统的参数如表 1 所示。

表 1 储能系统参数

Table 1 Parameters of energy storage system

储能类型	蓄电池	超级电容
功率成本/(元·kW ⁻¹)	1 500	1 500
容量成本/(元·kWh ⁻¹)	E≤300 kWh	1 000
	E>300 kWh	1 200
		27 000
		30 000
充放电效率	0.80	0.95
SOC 范围	[0.2,0.8]	[0.1,0.9]
使用寿命/a	10	10
运行维护成本/(元·kWh ⁻¹)	30	40
折现率/%	5	5

原有的配电网基础上，在节点 9、14、20、28、32 接入风电，以第 9 节点为例，其 1d 内负荷和风速预测值如图 3 所示。当风电渗透率为 50% 时，每台风机额定容量均为 380 kW，额定风速设定 15 m/s，切入风速设定 5 m/s，切出风速设定 25 m/s。

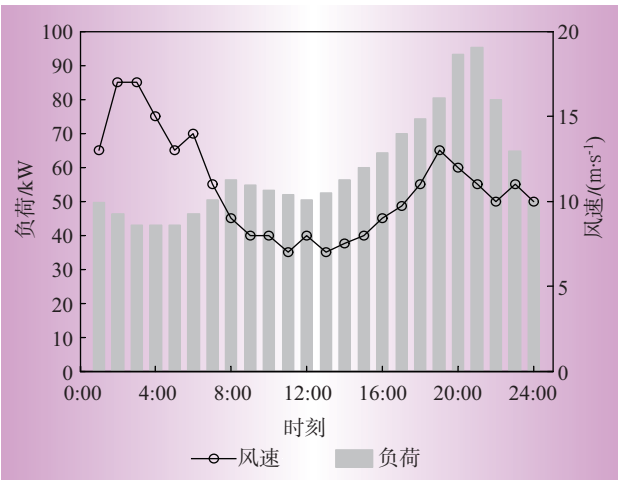


图 3 负荷及风速预测

Fig. 3 Load and wind speed prediction

4.2 算例仿真结果

选取风电渗透率为50%的场景,基于改进的灰狼算法求解混合储能系统优化配置的模型,得到一组最优的Pareto解集如图4所示。

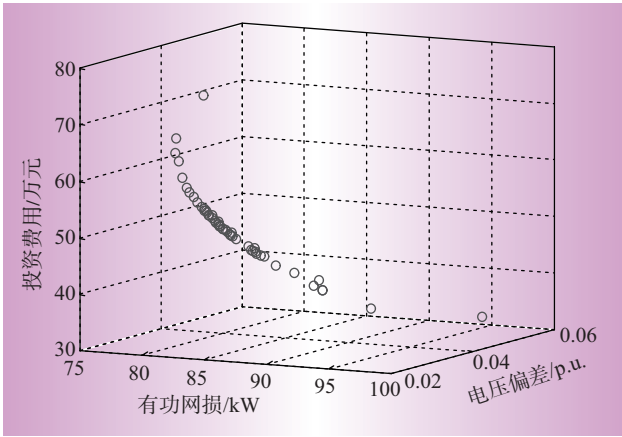


图4 Pareto最优解集
Fig. 4 Pareto optimal solution set

由图4可见,如果仅仅以投资费用最小为目标,则会增加系统有功网损和电压偏差;如果只追求有功网损和电压偏差最小,又会造成投资费用过高。根据模糊隶属度评价决策,基于式(17)一式(18)选择投资费用为51.46万元、有功网损80.68 kW、电压偏差0.035 1 p.u.的折衷解,此时对应的配置结果为第17节点接入容量为295 kWh、功率223 kW的混合储能系统,第32节点接入容量为748 kWh、功率663 kW的混合储能系统。考虑储能容量选型,实际17节点配置容量300 kWh,32节点配置容量750 kWh。

4.3 场景对比分析

设置3种不同的场景,分别为case1:无风电,无储能;case2:含风电,无储能;case3:含风电,配置储能系统。将所得配置方案与未安装储能系统时的效果对比结果如表2所示。

表2 不同场景结果对比			
Table 2 Comparison of different scene results			
场景	Case1	Case2	Case3
储能系统安装节点			17 32
储能容量/kWh			295 748
储能功率/kW			223 663
有功网损/kW	202.68	120.03	80.68
电压偏差/p.u.	0.086 9	0.065 6	0.035 1
储能年投资费用/万元			51.89
风电消纳率/%		73.68	90.35

由表2分析可知,在原配电网的多个节点接入风电之后,系统的有功网损和电压偏差均有不同程度的减小。当按照所求得配置方案在17和32节点接入恰当的储能装置之后,系统有功网损和电压偏差有更大程度的改善。Case3相较于Case2而言,

有功网损从120.03 kW下降至80.68 kW,下降率达32.78%,电压偏差从原来的0.065 6 p.u.下降至0.035 1 p.u.,下降率达46.5%。此外,风电消纳率提高了16.67%。验证了本文所提模型有效性,配置储能系统后确实降低了风电的不利影响,提高了风电利用率与系统电能质量。

在Case3的配置结果中,依据储能型号选择大于所需容量且最接近结果容量的型号,17节点接入蓄电池200 kWh、超级电容器100 kWh,32节点接入蓄电池550 kWh,超级电容器200 kWh,折算后实际年投资费用为51.89万元。

配置储能系统前后含风电节点的电压偏移对比如图5所示。结果表明Case3通过对储能系统进行合理配置,使含风电的节点的最高电压偏移有不同程度减小。所有节点电压偏移量均降低到0.04 p.u.以下,满足系统运行要求。

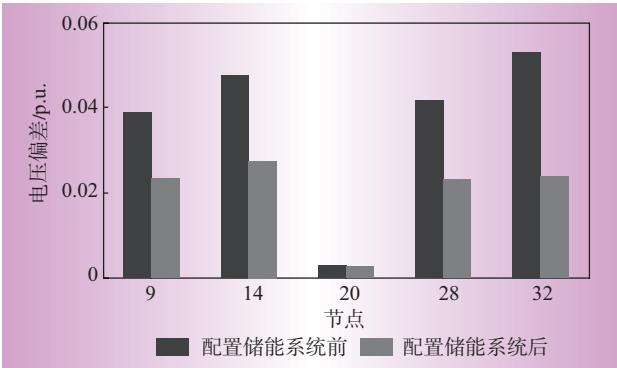


图5 含风电的节点的电压偏移对比
Fig. 5 Voltage deviation comparison of nodes with wind power

逐步调整风电渗透率,分析不同情况下的储能配置情况,得到的储能配置方案如表3所示。根据表3分析可得,风电渗透率逐渐升高时需要接入更大容量的储能系统来改善系统的电能质量,提高风电消纳,具体储能配置仍依据储能型号选择大于所需容量且最接近结果容量的型号。当风电渗透率由10%增长到50%时,储能系统投资费用逐渐提高,但给电力系统带来的年收益也在增加。

表3 不同风电渗透率下的储能配置情况					
Table 3 Energy storage allocation under different wind power permeability					
风电渗透率/%	安装节点	储能容量/kWh	储能功率/kW	年投资费用/万元	年运行收益/万元
10	17	430	368	27.42	31.57
	32	388	297		
30	17	307	245	35.49	55.76
	32	388	297		
50	17	295	223	51.89	89.67
	32	758	663		

分别采用NSGA-II、灰狼算法、改进灰狼算法对

本文模型进行求解,其中NSGA-II同样采用模糊隶属度方式选取折衷解,灰狼算法以权重法求解多目标优化模型。不同求解情况如表4所示。

表4 不同算法求解结果对比
Table 4 Comparison of the results of different algorithms

算法	有功网损/kW	电压偏差/p.u.	年投资费用/万元	求解时间/s
NSGA-II	112.70	0.057 1	135.33	246.97
灰狼算法	102.94	0.049 2	93.09	97.43
改进灰狼算法	80.68	0.035 1	89.67	89.52

根据表4分析,采用NSGA-II求解本文所提优化配置模型,比较容易陷入局部最优,收敛情况较差,求解时间过长。改进后的灰狼算法依靠混沌初始化方式及优秀的狼群寻优机制扩大了搜索范围,引入模糊隶属度和非支配排序提高了求解多目标函数的效率。

5 结束语

本文以有功网损、电压偏差以及总投资费用最小为目标函数,引入机会约束、潮流约束以及储能约束等相关约束,提出混合储能系统的优化配置方法,得到如下结论:

- (1) 在含风电接入的配电网中配置合理的储能系统容量,能够有效提高风电利用效率,并改善电能质量。
- (2) 综合考虑不同储能容量和功率的相互制约,以及配置储能的经济性和安全性,对于整个系统的经济稳定运行至关重要。
- (3) 采用本文所提改进灰狼算法,能够有效求解相应的多目标模型,结果具有较高的准确性。

本文提出的方法与得到的结论对分布式能源的规划与研究具有借鉴意义。如何提高储能技术,降低储能成本,提高风电利用效率,将是未来分布式能源发展的重要研究方向。

参考文献:

[1] 刘敦楠,徐尔丰,刘明光,等. 面向分布式电源就地消纳的园区分时电价定价方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(20):19-28.
LIU Dunnan, XU Erfeng, LIU Mingguang, et al. TOU pricing method for park considering local consumption of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 19-28.

[2] 黄瀚燕,周明,李庚银. 考虑多重不确定性和备用互济的含风电互联电力系统分散协调调度方法[J]. 电网技术,2019,43(2):381-389.
HUANG Hanyan, ZHOU Ming, LI Gengyin. Coordinated decentralized dispatch of wind-power-integrated multi-ar-

ea interconnected power systems considering multiple uncertainties and mutual reserve support[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):381-389.

[3] 高逸,吴耀武,宋新甫,等. 可再生能源配额政策对新能源发展影响分析及消纳策略研究[J]. 电力需求侧管理,2019,21(1):56-61.
GAO Yi, WU Yaowu, SONG Xinfu, et al. Analysis on the effect of renewable portfolio standards on renewable energy development and accommodation strategies study[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):56-61.

[4] 李建林,田立亭,来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):15-25.
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy Internet background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23):15-25.

[5] 宁阳天,李相俊,董德华,等. 储能系统平抑风光发电出力波动的研究方法综述[J]. 供用电,2017,34(4):2-11.
NING Yangtian, LI Xiangjun, DONG Dehua, et al. A review of the research methods of smoothing wind/PV power output with energy storage systems[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(4):2-11.

[6] 吴仁光,王云葛,李凯鹏,等. 考虑季节特性及节点电压偏移的储能系统优化配置[J]. 电力科学与工程,2020,36(1):18-24.
WU Renguang, WANG Yunge, LI Kaipeng, et al. The optimal configuration of energy storage system considering seasonal characteristics and node voltage deviation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(1):18-24.

[7] 王良缘,江岳文,王杰. 考虑参与多市场交易的电网侧储能优化配置[J]. 电网与清洁能源,2020,36(11):30-38.
WANG Liangyuan, JIANG Yuewen, WANG Jie. Optimization of grid-side energy storage considering multi-market transaction[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11):30-38.

[8] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):174-182,188.
CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.

[9] 严哲. 基于改进ABC算法的微电网混合储能容量配置方法研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2020.
YAN Zhe. Research on hybrid energy storage capacity allocation of micro-grid based on improved ABC algorithm[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.

[10] MIRJALILI S, LEWIS A. grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3):46-61.

[11] KOHLI M, ARORA S. Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2018, 5(4):458-472.

作者简介:

杨晓雷(1981),男,河南周口人,硕士,高级工程师,主要从事电网调度运行方式及新能源管理相关工作;
丁磊明(1981),男,浙江嘉兴人,工程师,主要从事电网调度运行管理相关工作;
李逸鸿(1997),男,湖北黄冈人,硕士,主要从事电力系统优化运行等方面的工作。

(责任编辑 殷莱吟 史倩芸)