

[优化配置]

考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法

文/王睿思

中铁第五勘察设计院集团有限公司

由于新能源在出力方面具有间歇性的特点，因此在进行综合能源储能容量配置时，通常会因缺乏对新能源出力以及系统能源需求之间的有效平衡而导致配置效果不佳。为解决这一问题，提出考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法。测试结果表明，该方法具备较为理想的配置效果。

综合能源系统作为整合多种能源资源、实现能源互补和高效利用的重要平台，其在新能源消纳、能源转换和储存等方面具有显著优势。然而，新能源的出力特性使得综合能源系统在运行过程中需要面对更加复杂的能源管理和优化问题。特别是在储能系统的配置与优化方面，如何根据新能源的出力特性，合理配置储能系统的容量和类型，以实现对新能出力有效平抑和电力负荷的灵活调节，成为综合能源系统研究和应用的关键问题。对此，本文提出一种基于多目标优化理论的储能容量配置方法。该方法综合考虑电力系统的稳定性、可靠性和经济性等多个方面的优化目标，实现对储能容量的全局优化和合理配置。通过引入多目标优化算法，使该方法能够在多个优化目标之间找到最优的平衡点，提高储能系统的综合效益。

考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法

1. 考虑新能源出力特性的综合能源系统建模

考虑到新能源出力的间歇性以及储能出力补偿性，本文首先结合综合能源系统参数以及变量对储能模块的充放电特性进行描述，从而实现系统建模。假设 $P_{RE}(t)$ 代表 t 时刻下新能源出力值， E_{cap} 代表

储能系统的最大存储容量， $SOC(t)$ 代表 t 时刻下储能系统的荷电状态，由此可以对综合能源系统的储能模块充放电过程进行描述，具体表达式为

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \frac{\eta_{ch} + P_{ch}(t) \cdot \Delta t + P_{RE}(t)}{E_{cap}} \quad (1)$$

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) - \frac{P_{dis}(t) \cdot \Delta t + P_{RE}(t)}{\eta_{dis} \cdot E_{cap}} \quad (2)$$

式中， $P_{ch}(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 分别代表 t 时刻下储能系统的充放电功率； η_{ch} 和 η_{dis} 分别代表充放电过程中产生的能量损失； Δt 代表时间步长。

当新能源出力与能源需求之间存在不平衡时，储能系统可以通过充放电来达到平衡。假设综合能源系统的能源需求为 $P_{demand}(t)$ ，那么当新能源处理过剩时，储能系统可能会进行充电操作，从而存储多余的能量，由此可得到新能源出力与储能充放电调度之间的关系表达式为

$$\begin{cases} P_{ch}(t) = \min \{ P_{RE}(t) - P_{demand}(t), P_{ch,max} \} \\ P_{dis}(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， $P_{ch,max}$ 代表储能系统充电功率的上限。

同理，当新能源出力不足时，放电功率可根据能源需求以及储能系统的放电能力进行确定，此时充电功率的值为0，以此可以得到新能源出力特性与储能充放电之间的关系表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{dis}}(t) = \min\{P_{\text{demand}}(t) - P_{\text{RE}}(t), P_{\text{dis,max}}\} \\ P_{\text{ch}}(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{dis,max}}$ 代表储能系统放电功率上限。

通过上述步骤即可完成对于综合能源系统的建模处理。

2. 综合能源系统储能容量配置优化目标函数构建

针对上述能源系统的建模结果, 综合考虑系统的成本及可靠性, 对优化目标函数进行构建, 并结合储能系统的荷电状态以及容量设计出约束条件。

假设 C_{cap} 代表综合能源系统中储能系统的单位容量成本, T 代表优化周期的总时间步长, C_{op} 代表储能系统单位充放电功率的操作成本, 则本文所构建出的多目标优化函数表达式为

$$\begin{aligned} \min J = & C_{\text{cap}} \cdot E_{\text{cap}} \\ & + \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{op}} + C_{\text{loss}} \cdot \left[\frac{P_{\text{ch}}(t)}{\eta_{\text{ch}}} - P_{\text{ch}}(t) \right] + C_{\text{loss}} \cdot [P_{\text{dis}}(t) - \eta_{\text{dis}} \cdot P_{\text{dis}}(t)] \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, C_{loss} 代表单位能量损失成本。

约束条件确保储能系统的运行在安全、有效的范围内, 对此本文结合系统容量以及荷电状态等条件, 对约束条件进行设计, 具体表达式为

$$\begin{cases} 0 \leq E_{\text{cap}} \leq E_{\text{cap,max}} \\ SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \\ P_{\text{ch}}(t) \cdot P_{\text{dis}}(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $E_{\text{cap,max}}$ 代表储能系统容量的上限, SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别代表储能系统荷电状态的最小值以及最大值。

在上述约束条件中, $P_{\text{ch}}(t) \cdot P_{\text{dis}}(t) = 0$ 是为了保证储能系统不能够同时进行充放电操作, 因此对其进行了充放电互斥约束。

储能容量配置优化方案输出

针对上述构建出的多目标优化函数, 通过引入动态适应度权重, 对麻雀搜索算法进行改进, 并对发现者的位置进行更新, 从而搜索出最优配置方案。首先将每个麻雀个体设为一组储能容量配置参数组合, 并将多目标优化函数的值设为适应度值, 根据适应度值对麻雀进行排序。考虑到随着迭代的不断进行, 适应度值的分布可能会发生变化, 这可能导致算法在后期陷入局部最优。对此, 本文引入权重函数 $w(t)$, 从而得到加权适应度值, 以此平衡

算法的局部搜索效果。权重函数表达式为

$$w(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{max}}}\right) \quad (7)$$

式中, T_{max} 代表最大迭代次数; t 代表当前迭代次数。

以此可以对发现者的位置进行更新, 具体表达式为

$$E_{\text{cap}}^{i,j}(t+1) = E_{\text{cap}}^{i,j}(t) \cdot \exp\left(-\frac{J_i - J_{\text{best}}}{|J_i - J_{\text{best}}| + \varepsilon_i}\right) + \text{rand} \cdot |J_i - J_{\text{mean}}| \quad (8)$$

式中, $E_{\text{cap}}^{i,j}(t)$ 为第 i 个个体在第 j 维度中的位置; J_i 为个体对应的适应度值; J_{best} 为当前群体中的最优适应度值; J_{mean} 为适应度均值; rand 为随机数; ε_i 为平衡项。

通过采用上述方式对发现者位置进行不断更新, 结合权重函数得到加权适应度值, 当加权适应度值达到收敛时, 即可输出对应的参数配置组合。将本节内容与上述提到的综合能源系统建模以及多目标优化函数构建等相关内容进行结合, 至此, 考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法设计完成。

实验论证

为证明本文提出的考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法在实际配置效果方面优于常规的综合能源系统储能容量配置优化方法, 在理论部分的设计完成后, 构建实验环节, 对本文方法的实际配置效果进行检验。

1. 实验说明

为验证本文提出的考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法在实际配置效果方面的优越性, 本次实验选取了两组常规的综合能源系统储能容量配置优化方法作为对比对象, 分别为基于遗传算法的综合能源系统储能容量配置优化方法以及基于灰狼算法的综合能源系统储能容量配置优化方法。通过构建实验平台, 采用三种配置方法对同一个综合能源系统进行储能容量配置, 对比不同方法的实际配置效果。

2. 实验对象

本实验所选取的综合能源系统位于一个典型的城市区域, 系统主要由供能网络、能源交换环节、

能源存储环节、终端综合能源供用单元以及大量终端用户共同构成。系统采用10 kV和0.4 kV两级电压供电，其中10 kV线路总长度为10 km，0.4 kV线路总长度为50 km。系统最大供电能力为20 MW，天然气管道总长度为20 km，最大供气能力为5 000 m³/h。针对选取的综合能源系统，本次实验采用MATLAB仿真软件对其进行仿真建模，通过对建模参数进行调整，从而模拟出不同的运行工况。系统仿真拓扑架构如图1所示。

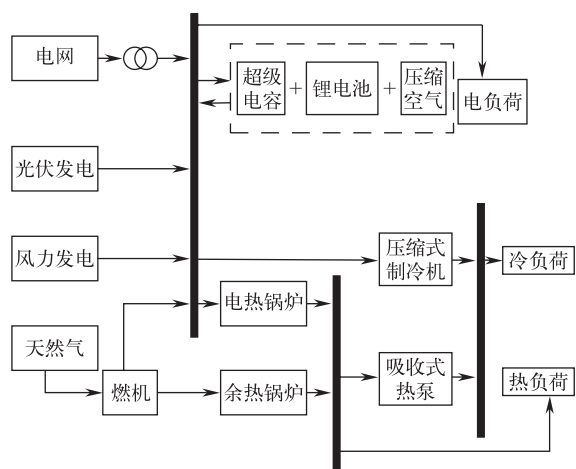


图1 综合能源系统仿真架构

针对上述构建出的综合能源仿真模型，分别使用三种方法对其进行容量配置优化。待配置完成后，分别运行三种配置方法下的仿真模型，并对能源系统的出力情况进行记录。

3. 优化配置效果对比

在本文配置方法下，综合能源系统的出力情况如图2所示。

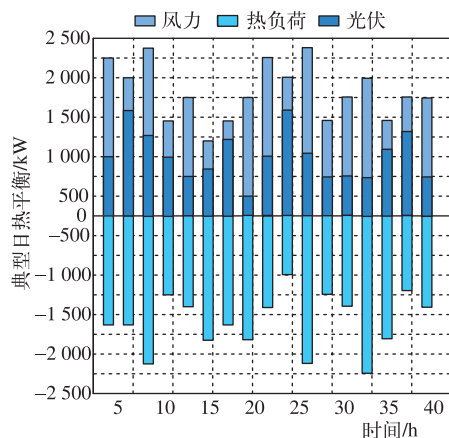


图2 本文配置方法下的综合能源系统出力情况

通过图2可以看出，本文提出的配置方法能够有效平衡不同机组的出力情况，其热负荷波动情况较为平均。为提高实验结果的可靠性，本次实验以不同配置方法下的综合能源系统储能容量利用率作为对比指标，对方法的实际配置效果进行衡量，具体实验对比结果见表1。

表1 不同方法的储能容量利用率对比结果（%）

实验编号	储能规划容量 /MW·h	负荷峰值/ MW	本文方法	常规方法 A	常规方法 B
01	5	2.4	82	70	64
02	10	3.1	85	65	68
03	15	3.5	79	72	63
04	20	4.2	86	74	61
05	25	4.6	81	63	64
06	30	5.1	83	62	59
07	35	5.6	84	56	58
08	40	5.9	86	59	63

通过上述实验结果可以看出，在针对相同的综合能源系统进行储能容量配置时，不同方法的实际配置效果也有所不同。通过数值上的对比可以明显看出，本文提出的考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法在实际配置效果方面明显优于两种常规的配置方法，系统能够更准确地匹配能源需求和供应。

结束语

本研究以考虑新能源出力特性的综合能源系统储能容量配置优化方法为核心，深入探讨新能源出力特性对综合能源系统稳定性和可靠性的影响，并针对性地提出储能容量的优化配置策略。通过本研究的开展，不仅对新能源出力特性有了更为深刻的认识，更为综合能源系统的储能容量配置提供科学依据和实用方法。EA

（收稿日期：2025-01-05）

参考文献

- [1] 王坤, 李岩, 于建成, 等. 电-热一体化综合能源系统容量配置与运行策略双层优化模型[J]. 供用电, 2024, 41 (6): 55-63.
- [2] 王心蕊. 考虑柔性负荷的综合能源系统容量优化配置[J]. 电气技术与经济, 2024, (4): 383-387.