

采用负载侧灵活性方案的风电-太阳能-储能综合能源主动调度方法

文/乔华
中海石油（中国）有限公司北京新能源分公司

受到风电-太阳能-储能综合能源在电网调度过程中不同端侧负载差异的影响，整体能源调度偏差出现较大误差，单一能源间的调度权重一致性表现偏差，致使能源主动调度的感知能力降低，严重影响全局电网能源调度效率。为解决风电-太阳能-储能综合能源调度问题，利用负载侧灵活方案对其调度参量进行优化，具体如下：首先建立风电-太阳能-储能综合能源负载侧目标函数；然后基于负载侧灵活方案进行磷虾调度策略优化；接着完成综合能源主动调度函数计算；最后对计算函数的主动调度条件加以约束；通过对比实验证明，提出方法稳定、有效，能够解决现阶段综合能源调度存在的偏差及效率问题，且可提升空间巨大。

在能源互联网背景下，综合能源系统中的多种可再生能源通过相互耦合形成综合能源网络，不同能源间的协调互补成为综合能源系统未来发展的必然趋势。而大规模可再生能源的接入使得传统电网中的平衡关系发生改变。其中，以风电-太阳能-储能综合能源的组合方案在电网调度的表现最具代表性^[1-2]。传统调度方法在该类型能源组合调度过程中，普遍表现为单一能源调度偏差过大，整体调度效率不一致。究其原因，在于不同能源间调度负载不一致，导致调度约束无法做到综合能源的控制变量的统一^[3-4]。因此，如何实现对不同能源间的灵活调度，成为目前亟待解决的问题。

负载侧灵活性方案在方法中的研究与应用

1. 建立风电-太阳能-储能综合能源负载侧目标函数

根据风电-太阳能-储能综合能源负载侧互补调度特征，对其进行目标函数建立。将风电-太阳能-储能综合能源负载侧外网运行载荷最小化，并将其作为负载侧调度综合能源负荷的优化目标。考虑到

储能装置与风电装置所对应的运行载荷为定值^[5-6]，因此在优化过程中可以不考虑此二者对负载结果的影响。常规太阳能发电机组运行载荷 C_1 计算公式为

$$C_1 = \sum_{i=1}^{N_1} (a_i + b_i P_i + c_i P_i) \quad (1)$$

式中， a_i 、 b_i 、 c_i 为太阳能发电外网的全局载荷系数； N_1 为太阳能发电板数量； P_i 为太阳能发电机组所输出的有功系数。

储能系统运行过程中的端侧负载 C_2 计算公式为

$$C_2 = \sum_{i=1}^{N_2} e_i \frac{d_i A}{h_i} \quad (2)$$

式中， e_i 为第 i 台储能单元载荷系数； A 为储能系统最小储电系数； d_i 为第 i 台储能单元的储能总量； h_i 为第 i 台储能单元的电能转化率； N_2 为储能系统下的单元总量。

结合太阳能发电实际有功系数，可得到太阳能实际外围端侧的负载 C_3 为

$$C_3 = \sum_{i=1}^{N_3} f_i \frac{[1 + g_i(T_1 - T_2)]K_1}{K_2} \quad (3)$$

式中, f_i 为第 i 个太阳能光伏板电路负载系数; g_i 为光伏板表面温度系数; T_1 、 T_2 分别为设定工作温度与实际工作温度; K_1 、 K_2 分别为设定端侧辐射强度与实际辐射强度; N_3 为太阳能光伏板总数。

通过风力发电实际有功系数, 可计算得到风力发电端侧负载 C_4 为

$$C_4 = \sum_{i=1}^{N_4} k_i \frac{L_i(v_1^2 - v_2^2)}{v_2^2 - v_3^2} \quad (4)$$

式中, N_4 为风电机组总量; L_i 为额定总功率, v_1 、 v_2 、 v_3 分别为端侧的实际风速、切入速率与额定风速; k_i 为第 i 台风机所对应端侧的载荷系数。

将上述各项运行载荷叠加, 可以得到风电-太阳能-储能综合能源负载侧运行载荷。至此完成对风电-太阳能-储能综合能源负载侧供给侧调度目标函数的计算。

2. 基于负载侧灵活方案的磷虾调度策略优化

根据上述计算所得目标函数, 基于综合能源负载侧特征利用磷虾群算法对其调度策略进行优化。磷虾群算法的基本原理如图1所示。

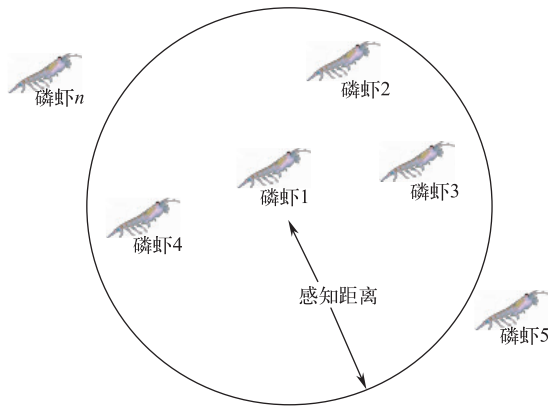


图1 磷虾群算法的基本原理

根据综合能源构成特征及其调度过程与磷虾觅食群体行为相似性, 可将影响磷虾觅食的种群密度与食物两个因素视为调度策略优化目标, 其中每个磷虾个体对应综合资源中的任意一种资源, 则其磷虾个体所在位置对应的资源初始状态可以描述为

$$\frac{dX_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (5)$$

式中, X_i 为第 i 个磷虾个体位置所对应综合能源向量; N_i 为个体 i 受到相邻个体影响后的位置变化; F_i 为受到食物 (调度目标) 变化影响导致的觅食

(调度) 变化; D_i 为个体的随机选择作用下导致随机变化; N_i 、 F_i 、 D_i 均为对应变化所用时间 t 的函数。

具体调度变化规律如下。

(1) 相邻因素影响

相邻因素影响的变化方式所对应的函数关系式可以描述为

$$N_i^{\text{new}} = N^{\text{max}} \alpha_i + \omega_n N_i^{\text{old}} \quad (6)$$

式中, N^{max} 为磷虾个体 (任意一种能源) 在每次迭代过程中的移动距离 (调度系数) 最大值; ω_n 为上一时间点下相邻因素影响的加权系数, 对应系数取值范围为 $[0, 1]$ [7-8]; α_i 为相邻因素影响的觅食 (调度) 方向, 其计算方法为

$$\alpha_i = \alpha_i^{\text{local}} + \alpha_i^{\text{target}} \quad (7)$$

$$\alpha_i^{\text{local}} = \sum_{j=1}^K \hat{K}_{i,j} \hat{X}_{i,j} \quad (8)$$

$$\alpha_i^{\text{target}} = C^{\text{best}} \hat{K}_{i,\text{best}} \hat{X}_{i,\text{best}} \quad (9)$$

式中, $\hat{K}_{i,j}$ 、 $\hat{X}_{i,j}$ 分别为综合能源归一处理后所对应的适应度与个体位置, 其计算式为

$$\hat{K}_{i,j} = \frac{K_i - K_j}{K^{\text{worst}} - K^{\text{best}}} \quad (10)$$

$$\hat{X}_{i,j} = \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\| + \varepsilon} \quad (11)$$

(2) 指向性因素

指向性因素影响是由觅食食物 (能源调度要求) 对磷虾个体 (不同能源) 移动策略造成的决定性影响, 其计算式为

$$F_i = V_f \beta_i + \omega_f F_i^{\text{old}} \quad (12)$$

式中, ω_f 为个体的觅食策略的权重系数, 根据历史经验取值范围为 $[0, 1]$ [9-10]; V_f 为个体 i 在觅食 (调度) 过程中的游动 (速度); β_i 为该个体的觅食 (调度) 方向, 其表达式为

$$\beta_i = \beta_i^{\text{food}} + \beta_i^{\text{best}} \quad (13)$$

由于食物 (指向性因素) 是磷虾移动方向的决定性因素, 因此首先需要确定食物 (指向性因素) 的具体位置 (特征系数) 进行中心定义

$$X^{\text{food}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i} X_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i}} \quad (14)$$

进而通过计算可得到 β_i^{food} 、 β_i^{best} 各自对应的关系式

$$\beta_i^{\text{food}} = C^{\text{food}} \hat{K}_{i,\text{food}} \hat{X}_{i,\text{food}} \quad (15)$$

$$\beta_i^{\text{best}} = \hat{K}_{i,\text{best}} \hat{X}_{i,\text{best}} \quad (16)$$

(3) 随机因素

随机因素是在无策略控制条件下，磷虾个体按照运动规律（能源调度原始规则）进行的动作过程，这种随机因素可描述为

$$D_i = D^{\text{max}} \left(1 - \frac{I}{I_{\text{max}}} \right) \delta \quad (17)$$

根据上述三种因素，对其关系描述进行关联后可得到磷虾个体 i 所对应位置变化的数学模型，即基于负载侧灵活方案的磷虾调度策略函数为

$$\begin{cases} X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta t \frac{dX_i}{dt} \\ \Delta t = C_t \sum_{j=1}^{NV} (UB_j - LB_j) \\ C_t = C_t^{\text{max}} - \frac{C_t^{\text{max}} - C_t^{\text{min}}}{t_{\text{max}}} \times t \end{cases} \quad (18)$$

3. 综合能源主动调度函数

根据上述三种因素对负载侧的影响，对综合能源调度进行下列两种情况的主动函数优化。

(1) 常规性调度情况。

将全局能源外围端侧负载系数降至最低^[11-12]，对应调度的主动目标函数为

$$\min f_1 = C_E + C_F + C_{\text{om}} \quad (19)$$

式中， C_E 为从配电网调度资源的负荷开销； C_F 为能源损耗系数； C_{om} 为调度偏差损耗。

$$C_E = \sum_{t=1}^T c_e^t P_e^t \Delta t \quad (20)$$

式中， c_e^t 为 t 对应时间段内的调度系数； P_e^t 为 t 对应时间段内的能源存储总量； Δt 为主动调度时间间隔优化系数，根据历史经验时长设为1 h。

$$C_F = \sum_{t=1}^T c_{\text{fuel}} \frac{P_{\text{mt}}^t}{H \eta_{\text{mt}}} \Delta t \quad (21)$$

式中， c_{fuel} 为单位能源调度端侧所承受的载荷； η_{mt} 为综合能源储能单元的调度效率； P_{mt}^t 为 t 时间段内可调度系数下储能单元能够承受的输出功率； H 为综合能源的调度能效比。

$$C_{\text{om}} = \sum_{t=1}^T [\lambda_{\text{mt}} P_{\text{mt}}^t + \lambda_{\text{pv}} P_{\text{pv}}^t + \lambda_{\text{wt}} P_{\text{wt}}^t + \lambda_{\text{bess}} (P_{\text{ch}}^t + P_{\text{dis}}^t)] \quad (22)$$

式中， λ_{mt} 、 λ_{pv} 、 λ_{wt} 与 λ_{bess} 分别为太阳能、储能与风

电系统单位输出功率所对应的端侧维护载荷； P_{pv}^t 、 P_{wt}^t 分别为 t 时间段内太阳能和风电的调度效率； P_{ch}^t 、 P_{dis}^t 分别为 t 时间段内储能单元的充、放电效率。

(2) 非常规性调度情况

将全局能源外围端侧负载系数对应的调度开销总量降至最低^[15]，此时调度的主动目标函数为

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^M (\alpha_k P_{\text{mt}}^t + \beta_k P_e^t) \Delta t \quad (23)$$

式中， α_k 为全局能源系统在调度单位电能过程中第 k 种资源所对应的开销系数； β_k 为综合能源调度过程中所对应第 k 种能源开销的均值系数； M 为调度开销类别。

4. 主动调度约束

基于上述计算，对调度参量进行主动调度约束，避免调度过程中因为调度参量之间的差异，产生调度震荡，具体定义如下。

主动调度下全局综合能源负载侧的总功率供需约束，定义函数为

$$P_{\text{mt}}^t + P_{\text{pv}}^t + P_{\text{wt}}^t + P_e^t + P_{\text{dis}}^t = P_1^t + P_{\text{ch}}^t \quad (24)$$

式中， P_1^t 为 t 时段调度端侧负载的总负荷。

储能单元运行约束，定义函数为

$$\begin{cases} u_{\text{ch}}^t p_{\text{ch}}^{\text{min}} \leq p_{\text{ch}}^t \leq u_{\text{ch}}^t p_{\text{ch}}^{\text{max}} \\ (1 - u_{\text{ch}}^t) p_{\text{dis}}^{\text{min}} \leq p_{\text{dis}}^t \leq (1 - u_{\text{ch}}^t) p_{\text{dis}}^{\text{max}} \\ S_{\text{ES}}^t = S_{\text{ES}}^{t-1} + (p_{\text{ch}}^t \eta_{\text{ch}} + p_{\text{dis}}^t / \eta_{\text{dis}}) \Delta t \\ S_{\text{ES}}^{\text{min}} \leq p_{\text{ch}}^t \leq S_{\text{ES}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中， u_{ch}^t 为表征储能单元储电状态的0~1变量，若储电时系数值为1，其余状态下系数值为0； $p_{\text{ch}}^{\text{min}}$ 与 $p_{\text{ch}}^{\text{max}}$ 分别为综合能源储能单元储电功率的最小系数与最大系数； $p_{\text{dis}}^{\text{min}}$ 与 $p_{\text{dis}}^{\text{max}}$ 分别为综合能源储能单元放电功率的最小系数与最大系数； S_{ES}^t 与 S_{ES}^{t-1} 分别为 t 时段与 $t-1$ 时段储能单元存储综合能源的总储量； η_{ch} 与 η_{dis} 分别为 t 时段储能单元双向变换器端侧的充电、放电负载效能。

综合调度约束，函数为

$$\begin{cases} p_{\text{pv}}^{\text{min}} \leq p_{\text{pv}}^t \leq p_{\text{pv}}^{\text{max}} \\ p_{\text{wt}}^{\text{min}} \leq p_{\text{wt}}^t \leq p_{\text{wt}}^{\text{max}} \\ p_{\text{mt}}^{\text{min}} \leq p_{\text{mt}}^t \leq p_{\text{mt}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (26)$$

式中， $p_{\text{pv}}^{\text{max}}$ 与 $p_{\text{pv}}^{\text{min}}$ 分别为太阳能调度输出功率的最大值与最小值； $p_{\text{wt}}^{\text{max}}$ 和 $p_{\text{wt}}^{\text{min}}$ 分别为风电调度输出功率的最大值与最小值； $p_{\text{mt}}^{\text{max}}$ 和 $p_{\text{mt}}^{\text{min}}$ 分别为储能单元调度输出功率的最大值与最小值。

应用测试

对提出方法进行可行性对比测试，测试过程中引入基于神经网络的综合能源调度方法与基于聚类挖掘的综合性清洁能源调度方法作为参照组，分别记作参照方法-A与参照方法-B与提出方法，记作验证方法-X一同完成设定项目的测试。通过对比项目指标，分析测试数据，获得相同测试条件下，不同调度方法所得调度效果，并根据效果给出最终的测试结论。

1. 设置测试条件

为验证提出方法的有效性，以安徽省某示范性综合能源电网工程数据集为数据源，对方法进行仿真验证。在该综合能源电网中，包含太阳能、风电两类可再生能源发电机组，其基本结构如图2所示。

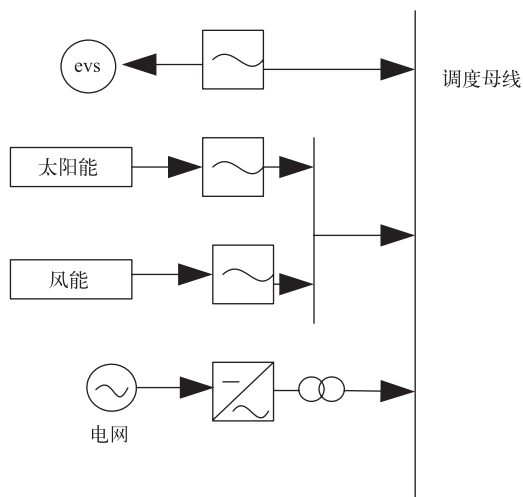


图2 测试调度网络结构

为保障电力负荷的稳定性，新能源机组必须与传统的内燃机组协同工作，在图2中，包含风力发电（WT）与光伏电池（PV）两种形式的机组。各个机组的详细发电参数见表1。

表1 测试机组参数配置

指标	WT	PV
$P_{\min}/\text{kW}$	0	0
$P_{\max}/\text{kW}$	120	150

2. 调度自适应性测试

根据设定参量随机抽取1组调度数据作为随机测试参量，设定测试过程中的调度迭代测试为5 000次，基础自适应指标为1.67，获得3种不同调度方法

的自适应曲线，如图3所示。

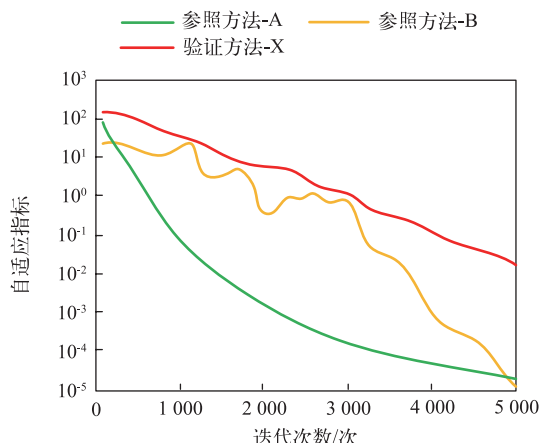


图3 综合能源随机调度样本下不同调度方法自适应曲线

根据图3中所示曲线整体走势可以判定，3种调度方法具有调度方向一致性，且在调度性能输出策略上具有相似特征。其中参照方法-A所得的曲线整体较为平缓，说明在调度自适应方面有着较好的控制能力，但结合曲线分布区域的指标值，其自适应能力整体偏低，且随着迭代次数的增加，自适应效果衰减越强；参照方法-B区别于参照方法A，其有着较好指标表现，但是整体控制效果偏差，波动较为频繁，根据调度周期1.67来看，其自适应效果一般；整体素质较好的为验证方法-X，曲线分布区域对应指标值较大，且波动情况虽不如参照方法-A平缓，但也远胜于参照方法-B，在自适应能力与自适应效果控制上到了平衡，故此可以判定自适应测试中的最佳调度方法为验证方法-X。

3. 调度响应测试

对提出调度方法调度响应能力进行验证，基于上述测试样本，在其中抽取1 000次迭代数据作为样本，提取对应调度方法的响应时间指标量，获得3种调度方法的响应指标值各1 000组，按照阈值100进行划分，并对划分指标进行均值计算，得到10组3种调度方法的均值响应指标，见表2。根据指标值越大，对应调度方法的能源调度效率越低；指标值越小，对应调度方法的能源调度效率越高的判定原则，对表2指标进行对比分析，得出测试结论。

通过对比表2数据可以发现，在数值方面验证方法-X所得响应时间指标在横向与纵向两个维度对比下，小于参照方法-A与参照方法-B所得响应指标，根据指标值越大，对应调度方法的能源调度效率越

低；指标值越小，对应调度方法的能源调度效率越高的判定原则，可以判定验证方法-X的调度响应效果最好，满足设计要求。

表2 调度响应测试结果

均值测试组	参照方法-A响应时间/ms	参照方法-B响应时间/ms	验证方法-X响应时间/ms
1	26.25	24.65	12.67
2	24.36	25.67	13.56
3	23.45	26.85	13.21
4	23.45	28.75	12.65
5	24.36	28.95	12.45
6	23.45	28.72	12.45
7	23.45	28.64	10.25
8	23.45	28.64	10.24
9	23.45	28.64	10.25
10	23.45	28.64	10.25

4. 测试结论

根据上述自适应与响应指标的测试结果，可以判定验证方法-X所代表的采用负载侧灵活性方案的风电-太阳能-储能综合能源主动调度方法综合性能最好，具备提升能源调度精准度，减小单位能源调度下的资源开销，降低调度偏差的能力。其依据如下：

1) 自适应能力可以说明调度方法是否具备资源调度过程中突发情况的处理能力，确保方法能够稳定运行。

2) 响应能力代表方法是否具备瞬时处理能力，且该能力基于对调度能源负载特征识别基础之上，因此具备响应能力的方法必然能够精准完成调度任务。

因此，得出验证方法-X满足设计预期要求的结论。

结束语

从综合能源调度过程中不同端侧负载入手，优化调度负载参量，统一约束调度参量，实现提升调度准确度，降低调度开销，优化整体效率的效果。为综合能源调度应用，提供一种易实现的可行性方案。但是受到综合能源规模和组合类型不同、应用环境不同的制约，提出方法还无法做到多场景匹配效果，因此需要在日后的研究中，不断优化能源组合适应策略，提升方法场景匹配能力。通过不断尝试引入多种网络控制算法，使其形成完整的控制网络，以此提升方法的系统学习能力，确保算法时刻

处于最佳状态。EA

(收稿日期：2025-01-20)

参考文献

- [1] 孟明, 商聪, 马思源, 等. 基于区块链的综合能源系统低碳优化调度研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 67-80.
- [2] 宁毕武, 张冠锋, 王海鑫, 等. 考虑梯次利用储能系统安全阈值的综合能源系统低碳经济调度方法[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 1-11.
- [3] 李虹, 林兰心, 赵小军. 基于需求侧用户响应的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 97-105.
- [4] 胡广润, 曾天舒. Niche-PSO算法在建筑冷-热-电综合能源自动化调度中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(5): 323-327.
- [5] 魏震波, 杨超, 李银江. 参与多元耦合市场的电-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 8-14, 22.
- [6] 李振, 赵鹏翔, 王楠, 等. 基于储能灵活性的综合能源系统优化调度方法[J]. 电气传动, 2023, 53(5): 33-40.
- [7] 赵辉, 李盼盼, 岳有军, 等. 考虑主从博弈的含碳捕集电厂的综合能源系统低碳经济调度[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(5): 253-264.
- [8] 张笑演, 王鲁裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46.
- [9] 李红伟, 吴磊, 荆浩婕, 等. 考虑风光不确定性的综合能源系统区间优化调度[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5076-5083.
- [10] 任景, 周鑫, 程松, 等. 计及负荷侧响应的高载能与新能源综合调度研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(4): 239-244.
- [11] 万锴, 刘闯, 陈磊. 基于改进樽海鞘群算法的区域综合能源系统优化调度[J]. 四川电力技术, 2023, 46(2): 39-44.
- [12] 宗昌盛, 吴帅, 张家豪, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2023, 19(2): 57-62.