

文章编号: 1005-0523(2019)06-0125-9

基于并行分子微分进化的综合能源系统优化调度

傅润炜¹, 姜磊², 孙惠娟³

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250022;
3. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为充分发挥清洁能源、热电联产、电热储能系统以及可控负荷的规模化效益, 实现多能源协调互补, 本文建立了综合能源系统热电联合优化调度模型; 并基于双层并行化思想和分子间作用势原理提出了一种并行分子微分进化算法, 可有效兼顾寻优深度和寻优速度, 从而可实现对该综合能源系统调度模型进行快速准确地求解; 最后通过算例应用及分析, 验证了本文方法的有效性及其优越性。

关键词: 综合能源系统; 并行分子微分进化; 热电联产; 多目标优化调度

中图分类号: TM721

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.019

随着世界范围内能源短缺和环境污染的矛盾日益突出, 风能、太阳能等可再生能源的利用得到了迅速发展。然而, 风电、光伏等可再生能源出力的间歇性和随机性特点也增加了电力系统调度难度及其运营风险^[1]。综合能源系统(integrated energy system, IES)为风电、光伏等可再生能源并网发电提供了有效的解决思路^[2]。IES通过控制、计量、通信等技术合理配置、协调调度多种资源实现 IES 与传统电厂相近的容量和可靠性, 并能利用系统中的备用容量资源灵活地参与电网调度。文献[3]研究了考虑供热网储热特性的电-热 IES 优化调度问题, 优化匹配电-热 IES 的源、网、荷, 促进可再生能源高比例消纳; 文献[4]研究了气-电联合 IES 鲁棒优化管理问题, 提出的方法可有效降低系统运行成本和提高风电渗透率; 文献[5]以可控负荷为研究对象, 研究了旋转备用辅助服务市场的 IES 模型和控制策略。当前, 国家大力支持热电联产集中供热, 降低污染, 提高能源利用率, 但其“以热定电”的发展模式导致其发电受到极大地制约^[6]。因此, 研究清洁能源、热电联产及其储能系统组成的 IES 热电联合调度具有重要意义, 但国内尚缺乏包含热电厂机组的 IES 相关领域的研究。为此, 本文提出综合考虑风电、光伏、热电联产机组、电热储能系统以及可控负荷, 构建新型的综合能源系统热电联合优化调度模型, 以实现多能源协调互补, 充分发挥热电联合的规模化效益。

IES 热电联合优化调度模型具有高维、非线性和多约束等特点, 采用普通优化算法求解不仅计算时间长、收敛慢, 而且难以得到真正的全局最优解。多核并行计算环境为此提供了新的解决方法。多核并行计算与普通的单核串行计算相比, 因其可在同一时间执行更多的线程任务, 对于相同的计算任务来说其计算时间会显著减少^[7]。群智能优化算法因其种群个体数量大、个体寻优计算过程完全相同等特点, 对其进行并行化改进具有先天优势^[8]。另外, 鉴于现代群智能进化算法普遍存在进化后期个体多样性不足的瓶颈, 使得算法寻优深度与寻优速度难以兼顾, 易导致进化停滞而陷入早熟, 本文拟利用分子间相互作用力中“远吸近斥”的原理对微分进化策略进行改进, 使得微分进化后期种群能够保持个体多样性, 以避免早熟。

收稿日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51867008)

作者简介: 傅润炜(1973—), 男, 工程师, 研究方向为综合能源系统。

通讯作者: 孙惠娟(1982—), 女, 副教授, 研究方向为新能源发电优化。

1.4 蓄电池组

本文 IES 储能设备为铅酸蓄电池,其运行过程中的荷电状态(SOC)表达如下

$$S_t = S_{t-1} + \frac{\eta P_t^{\text{bed}}}{C_{\text{bat}}} \quad (6)$$

式中: S_t 为蓄电池的 t 时段的SOC值; P_t^{bed} 为 t 时段蓄电池的充放电功率(正充负放); η 为充放电效率; C_{bat} 为蓄电池容量。

蓄电池循环寿命可表达为^[10]

$$cl_t = \rho_0 \left(\frac{D_0 D_R}{D_0 D_t} \right)^{\rho_1} \exp[\rho_2 (1 - \frac{D_0 D_t}{D_0 D_R})], D_0 D_t = 1 - S_t \quad (7)$$

式中: cl 为蓄电池寿命, h ; $D_0 D_t$ 为的 t 时段放电深度; $D_0 D_R$ 为 $D_0 D$ 的额定值; ρ_0, ρ_1 和 ρ_2 分别为蓄电池循环寿命系数。

2 IES 经济调度模型

2.1 目标函数

本文以含风光储热电联产型 IES 为对象,以 IES 净收益最高和煤耗量最少为调度目标建立协调优化调度模型。其中蓄电池组的充放电功率 P_t^{bed} , 热储能系统的储热、供热功率 $h_t^{\text{sc}}, h_t^{\text{sd}}$ 以及电热锅产热功率 P_t^{hp} 为调度变量。

2.1.1 煤耗量最少

IES 煤耗量最少化目标如下所示

$$\text{Min } B_{\text{tp}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{\text{op}}} [\alpha_i (P_{i,t}^{\text{tp}})^2 + \beta_i P_{i,t}^{\text{tp}} + \lambda_i P_{i,t}^{\text{tp}} h_{i,t}^{\text{tp}} + \gamma_i (h_{i,t}^{\text{tp}})^2 + \omega_i h_{i,t}^{\text{tp}} + \sigma_i] \quad (8)$$

式中: P_i^{tp} 和 h_i^{tp} 分别为热电联产机组的发电功率和产热功率; $\alpha_i, \beta_i, \lambda_i, \gamma_i, \omega_i, \sigma_i$ 为热电联产机组 i 的煤耗系数^[11]。由于 IES 的污染气体排放主要是由燃煤产生的,因此煤耗量最少化也意味着可以减少污染气体排放量。

2.1.2 IES 净收益最大

IES 净收益最大化目标如式(9)所示,IES 中的风电/光伏发电成本以及储热装置短期热损失较小,可忽略不计。

$$\text{Max } F = \sum_{t=1}^T [r_{\text{el}} P_{e,t}^{\text{sum}} + r_{\text{heat}} h_{t,t}^{\text{sum}} - r_{\text{coal}} B_{\text{tp}} - C_t^{\text{bat}} - C_t^{\text{puni}}] \quad (9)$$

式中: $r_{\text{el}}, r_{\text{heat}}$ 和 r_{coal} 分别为合同电价、合同供热价和煤价; B_{tp} 为煤耗量; $P_{e,t}^{\text{sum}}, h_{t,t}^{\text{sum}}$ 分别为 t 时段每小时平均发电量和产热量; $C_t^{\text{bat}}, C_t^{\text{puni}}$ 分别为电池折旧成本和合同违约成本。这些量的计算表达如下

$$P_{e,t}^{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{CW}}} P_{i,t}^{\text{w}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{GS}}} P_{i,t}^{\text{S}} - P_t^{\text{bid}} + \sum_{a=1}^{n_{\text{op}}} P_{a,t}^{\text{tp}} - \sum_{o=1}^{n_{\text{hp}}} P_{o,t}^{\text{hp}} \quad (10)$$

$$h_{t,t}^{\text{sum}} = \sum_{a=1}^{n_{\text{op}}} h_{a,t}^{\text{w}} - h_{t,t}^{\text{sc}} + h_{t,t}^{\text{sd}} + \sum_{o=1}^{n_{\text{hp}}} P_{o,t}^{\text{hp}} = \sum_{a=1}^{n_{\text{op}}} h_{a,t}^{\text{w}} - h_{t,t}^{\text{sc}} + h_{t,t}^{\text{sd}} + \sum_{o=1}^{n_{\text{hp}}} \eta_{\text{el}} P_{o,t}^{\text{hp}} \quad (11)$$

$$C_t^{\text{puni}} = r_{\text{epuni}} [P_{e,t}^{\text{sum}} - P_t^{\text{bid}}], r_{\text{epuni}} = \begin{cases} r_{\text{ehigh}} (P_{e,t}^{\text{sum}} \geq P_t^{\text{bid}}) \\ r_{\text{el}} + r_{\text{elow}} (P_{e,t}^{\text{sum}} < P_t^{\text{bid}}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $n_{\text{CW}}, n_{\text{GS}}, n_{\text{Gtp}}, n_{\text{hp}}, n_{\text{ESS}}$ 分别为风电、光伏、热电、热泵、蓄电池组的数量; P_t^{bid} 为合同发电量; h_t^{sc} 和 h_t^{sd} 分别为储热罐储热功率和放热功率,电锅炉功率 P_t^{hp} 与其产热功率 h_t^{hp} 相等; $r_{\text{ehigh}}=0.6r_{\text{el}}$ 为超发合同电价, $r_{\text{elow}}=0.5r_{\text{el}}$ 为

欠发合同的惩罚电价。

2.2 约束条件

1) 旋转备用容量约束

$$\sum_{i=1}^{n_{cw}} P_{i,t}^w + \sum_{j=1}^{n_{cs}} P_{j,t}^s + \sum_{a=1}^{n_{cp}} P_{a,t}^{lp,max} + \sum_{m=1}^{n_{ss}} (S_{m,t} - S^{\min}) C_{bat} \geq (1+RC\%) P_t^{\text{bid}} \quad (13)$$

式中: $RC\%$ 为备用容量占比。

2) 蓄电池储能约束

$$S^{\min} \leq S_t \leq S^{\max} \quad (14)$$

式中: S^{\min} 和 S^{\max} 分别为蓄电池 SOC 的上下限。

3) 储热约束

$$\begin{cases} hs_t = hs_{t-1} + \frac{h_t^{\text{sc}} - h_t^{\text{sd}}}{C_{hs}} \\ hs_{\min} \leq hs_t \leq hs_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: hs_t 为储热量; hs_{\max} 和 hs_{\min} 为储热量的上下限; C_{hs} 为储热量系数。

4) 爬坡率约束

$$-CR_i^{\text{down}} \leq P_{i,t}^{\text{st}} - P_{i,t-1}^{\text{st}} \leq CR_i^{\text{up}} \quad (16)$$

式中: CR_i^{up} 和 CR_i^{down} 分别为热电联产机组 i 的上下爬坡率限值。

此外, 系统运行还应满足供热约束和最小开/停时间约束等。

3 并行分子微分进化算法

3.1 分子微分进化算法

微分进化算法具有寻优速度快, 精度高等优点。然而, 在求解复杂多变量多目标优化问题时, 微分进化算法在进化后期易陷入个体多样性不足的瓶颈。为此, 通过在微分进化中引入分子间作用势原理产生了分子微分进化(MDE)算法^[12], 利用分子距离太近相互斥力会迅速增大的自动排斥机制自动维持种群内个体多样性, 从而可有效避免进化早熟而实现深度寻优。

在计算化学中用于表征分子间作用势能 V 的 L-J 势能函数式如下^[13]

$$V = 4\varepsilon \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right] = 4\varepsilon \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - (1 - \frac{r_0}{r})^6 \right] \quad (17)$$

式中: ε 为势能阱深度系数; r_0 为分子间作用势能恰好为零时的临界距离。可见当分子间距离 r 小于 r_0 时作用势能表现为随距离变小而急剧增大的斥力。

设个体为 d 维向量, 借鉴式(17)可将个体 X_i 与个体 X_j 之间的作用势 $V_{i,j}$ 表达为

$$\begin{cases} X_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d], X_j = [x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^d] \\ r_{i,j}^k = \min(|x_{i,k} - x_{j,k}|, r_0), v_{i,j}^k = [1 - (\frac{v_{i,j}^0}{r_0})^6] / 1000 \\ V_{i,j} = [v_{i,j}^1, v_{i,j}^2, \dots, v_{i,j}^d] \end{cases} \quad (18)$$

式中: 当个体 X_i 与个体 X_j 之间的维差距 r^k 小于临界距离 r_0 时, 该维排斥作用势 v^k 就会迅速增大; 而当 r^k 小于 r_0 , v^k 即直接为 0, 可显著提高计算效率。将式(18)与微分进化算法的变异机制结合即可构造如下分子微分进化变异机制

$$Y_i^{G+1} = X_{\text{best}}^G + F(X_{r1}^G - X_{r2}^G + V_{r1,r2}^G) \quad (19)$$

通过式(19)所示的分子微分进化变异机制, 当两个个体维度差距小于临界距离时, 该式后部的变异差分项不仅不会趋于零, 反而会迅速增大, 可变异得到多样化的新个体, 因此使得种群的个体多样性得以保持。

可不断跳出局部最优而实现深度寻优。进一步将经典多目标优化算法 NSGA-II 中的非劣排序操作与 MDE 结合即可形成多目标分子微分进化算法^[14]。

3.2 算法并行化

由于多目标进化算法需要对众多个体进行反复迭代计算和适应度评估,这个过程中存在大量各次相互独立的循环运算,若能采用并行计算技术,可获得很高的加速比,显著提升进化算法求解速度;同时还可将常规的单种群进化模式扩展为多种群并行进化模式,由于不同种群之间的个体会长期存在一定的差异,还可通过种群间移民操作改善个体多样性。鉴于此,本文基于多核并行计算环境提出并行分子微分进化算法 (PMDE)如图 2 所示。PMDE 的主要流程分为两层计算模式:在第一层中初始种群分为多个子种群并划分给不同的计算单元,每个计算单元分别独立运行对应的子程序,该层通过分解并行运算,可显著提升进化速度。当迭代运行到第 $Gen/2$ 代 (Gen 为总代数)后则进入第二层。该层会每经过一段进化间隔后利用群间通信实现各子种群间的精英个体移民,以通过分享精英个体使各子种群保持个体多样性并提速寻优效率。各子程序执行进度可能会存在快慢差别,为了保证各子种群的寻优速度和寻优效果的同步,进度快的子程序会通过执行路障函数与进度慢的子程序保持协调。为了降低各计算单元间的通信频率和通信量,减少延迟时间,本文设计每 10 代通信 1 次,各子种群每次通信分享各自的 5 个精英个体。各计算单元依序连成一个闭环,通信策略为环形单向通信模式。另外,为避免子种群中精英个体的重复,在结束一轮通信后应删除重复个体。

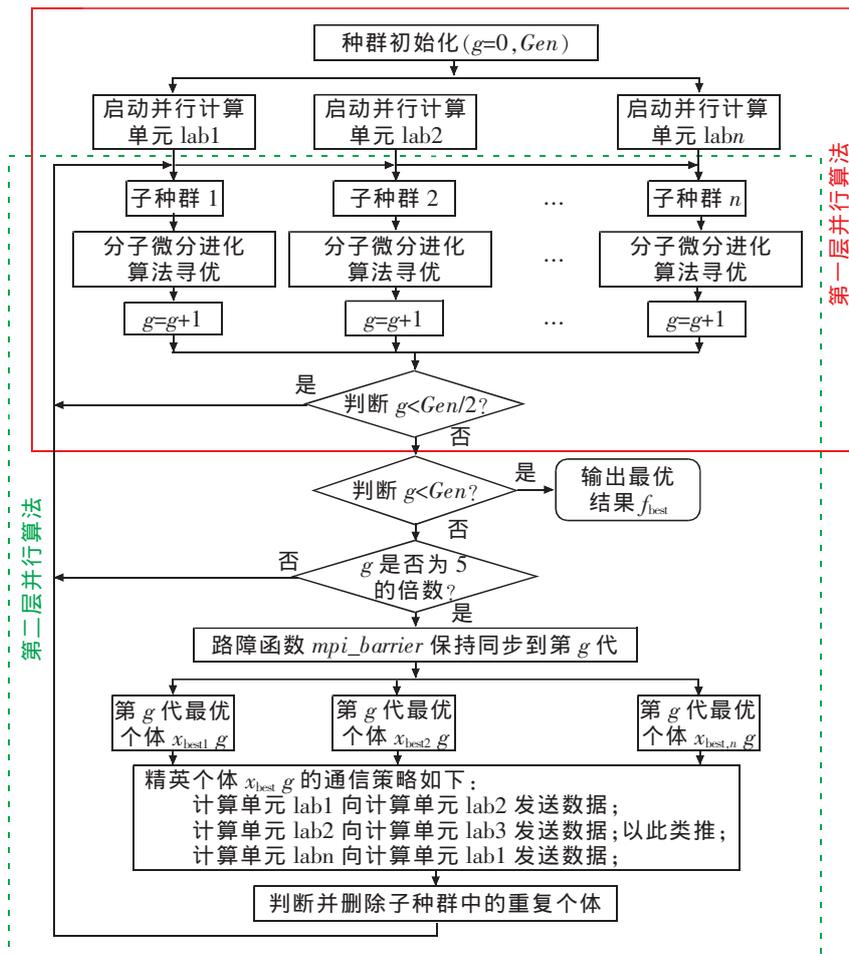


图 2 并行分子微分进化算法流程

Fig.2 The flow chart of PMDE algorithm

4 算例应用及分析

本文以某地区综合能源系统为研究对象,该 IES 中包含 2 个热电联产机组(220 MW)、3 个电热锅炉(10 MW)和 1 个蓄电池组(20 MW·h)。其中热电联产机组参数如表 1 所示;基于风电和光伏的随机分布特征模拟得到的风电/光伏出力如后图 5 所示;储能系统 $h_{s_{min}}=0.15$, $h_{s_{max}}=0.85$, $S^{min}=0.24$, $S^{max}=0.8$ 。

表1 热电机组参数
Tab.1 The parameters of thermoelectric generators

参数	机组 1	机组 2	参数	机组 1,2	参数	机组 1,2
α	0.000 63	0.000 63	CR_i^{down}	45	c_p	0.214 11
β	0.400 37	0.426 06	CR_i^{up}	45	c_m	0.435 89
λ	0.000 68	0.000 68	Δt_{min}^{up}	3h	h_{med}	124
γ	0.013 87	0.013 61	Δt_{min}^{down}	3h	h_{max}	241
ω	0.509 61	0.474 80	P_{min}	100	r_{el}	¥0.5
σ	1.331 21	1.653 06	P_{max}	211.6	r_{heat}	¥0.35

4.1 优化求解及算法对比

本文对 IES 热电联合经济调度模型进行并行优化求解是在 1 台 4 核 PC 机上启动 4 个并行计算单元运行。为了验证本文算法的优越性,分别采用了 PMDE, MDE 和普通 DE 3 种算法对模型进行优化求解,各自得到的 Pareto 最优解集如图 3 所示。可见,PMDE 所得到的 Pareto 最优前沿中 Pareto 最优解的准确性、分布均匀性和完整性等方面都是最好的。

3 种算法的运行时间和最优折中解结果对比如表 2 所示。其中煤耗量和净收益值为各算法所得到的最优折中解结果,本文最优折中解采用文献[15]中的基于与虚拟理想解距离最短原则提取。可见,采用多种群并行计算的 PMDE 求解速度最快,并可得到净收益更高和煤耗量(污染排放量)更低的 IES 优化调度方案。

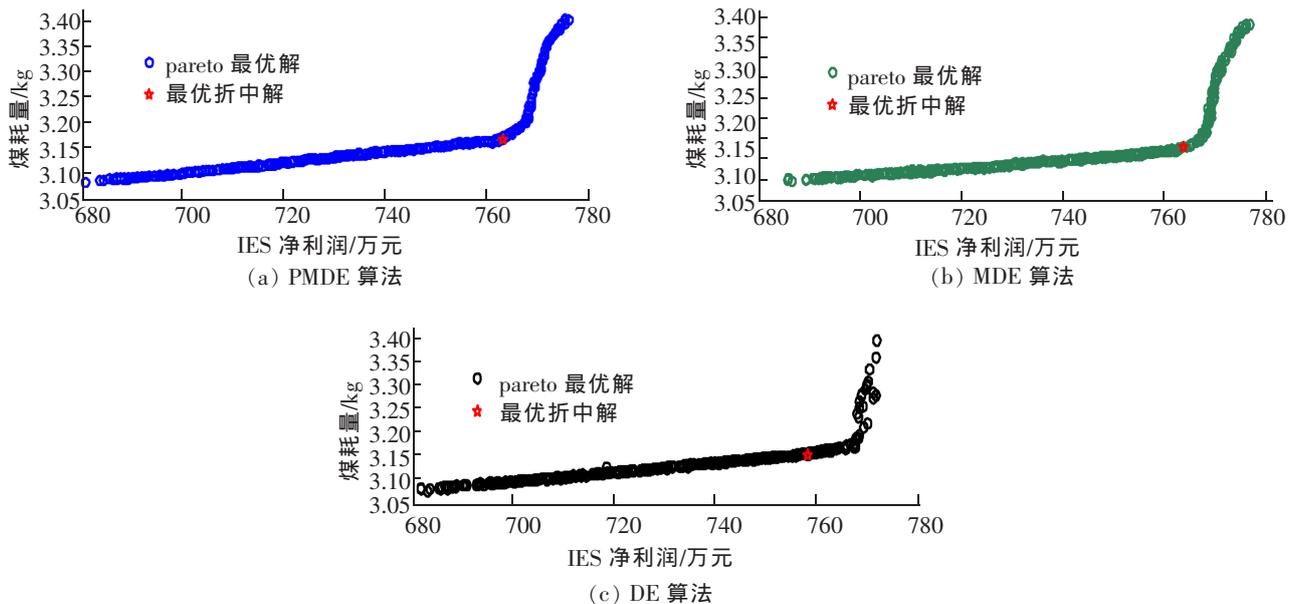


图3 Pareto 最优前沿对比

Fig.3 The comparison of Pareto fronts

表 2 计算结果对比

Tab.2 Comparison of results

算法类型	运行时间/s	煤耗量/t	净收益/万元
PMDE	3 186.8	3.160 1	766.367 7
MDE	4 272.1	3.172 4	765.087 5
DE	4 557.2	3.148 5	757.826 3

4.2 热电联合优化调度分析

1) 储能系统平抑风光出力效果。鉴于储能系统具有容量相对较小而响应速度较快的特点,在本综合能源系统中通过对蓄电池组充放电优化控制,可有效平抑风光出力波动性。平抑效果如图 4 所示,风电/光伏出力本身具有较强的波动性,小范围的变化非常频繁,而利用储能系统可较好地消纳频繁变化的风电/光伏出力。根据风电/光伏出力的变化,通过灵活控制储能系统平稳地充放电的过程,可有效平抑风电/光伏出力的波动性。

2) IES 产热调度。基于热电联产机组“以热定电”的运行原则, IES 热电联合优化调度应首先满足供热负荷需求,然后再满足供电负荷需求。本综合能源系统的各部分产热调度曲线如图 5 所示,可见实际总产热等于 IES 合同产热,完全满足热负荷用户的需求。

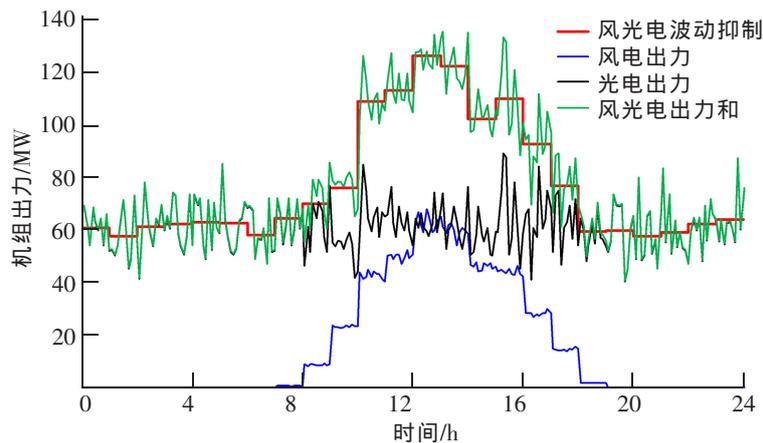


图 4 风电/光伏出力

Fig.4 The wind / photovoltaic power output

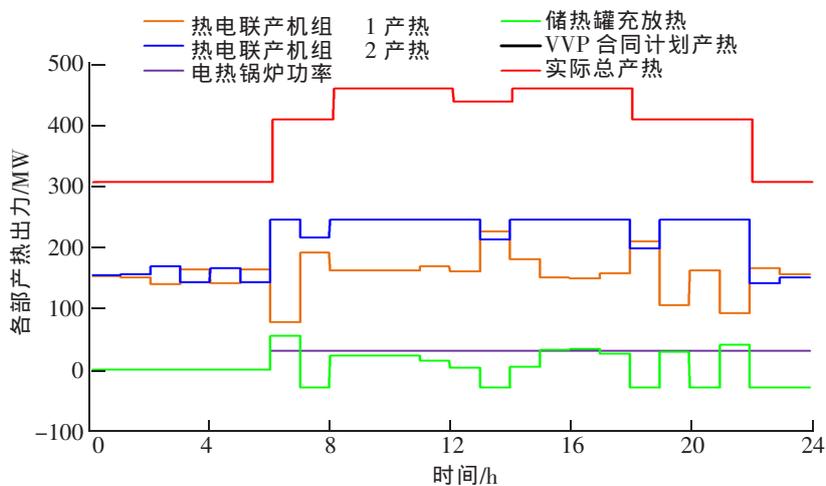


图 5 IES 产热出力

Fig.5 The thermal output of IES(integrated energy system)

3) IES 产电调度。由于综合能源系统中的热电联产机组受“以热定电”的制约缺乏调度灵活性,而风电/光伏出力不可控,故需要储热罐、蓄电池以及电锅炉(可调负荷)来实现能源互补。本综合能源系统中各类产电单元的出力曲线如图 6 所示。由于储能系统的容量限制,不能过充或过放,因此难以保证 IES 的总出力完全符合合同计划出力,这在“以热定电”的原则下也是允许的。

4) IES 储能系统。当电储能系统和热储能系统容量分别定为 20 MW 和 500 MW 时,蓄电池和储热罐储存容量占比变化曲线如图 7 所示。可见蓄电池和储热罐分别运行在各自容量的 24%~80%和 15%~85%的安全范围内,说明本 IES 中电/热储能系统满足安全稳定运行要求。

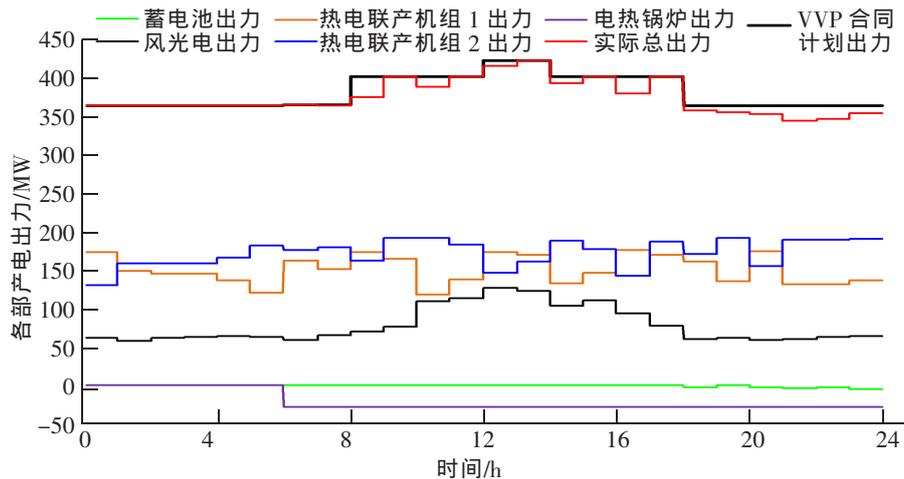


图 6 IES 产电出力

Fig.6 The electricity production output of IES (integrated energy system)

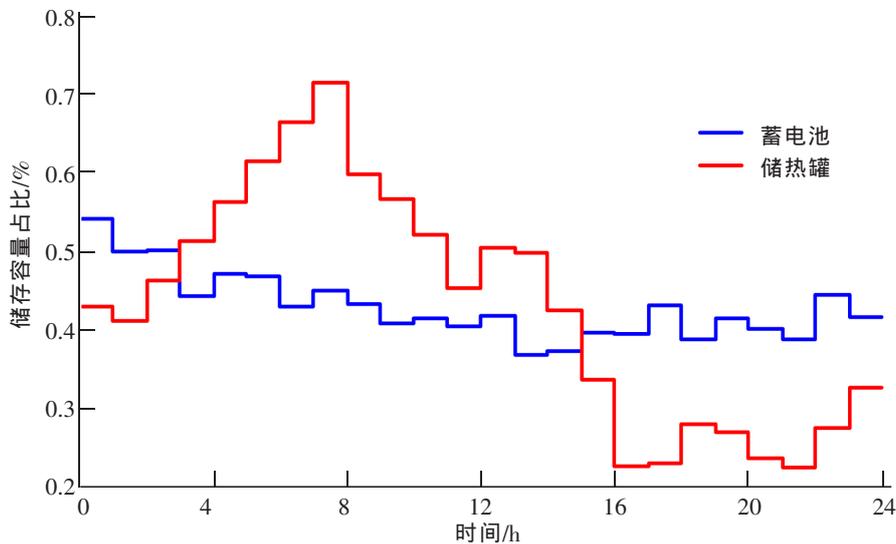


图 7 电热储能系统容量

Fig.7 Capacity of electric heat energy storage system

5 结论

本文构建了含有热电联产机组、清洁能源发电、储能系统的综合能源系统热电联合优化调度模型,以实现净收益最大化和煤耗量(污染排放量)最小化的多目标优化调度;并设计了并行分子微分进化算法对模型进行高效求解。研究表明,采用的多目标并行分子微分进化算法不仅能保持进化后期种群多样性而实现深度寻优,而且利用小规模种群并行进化可显著提升寻优速度,并能避免陷入局部最优。对于求解复杂的

IES 热电联合经济调度问题具有明显的优越性。本文建立的 IES 热电联合优化调度模型可充分发挥清洁能源、热电联产、电热储能系统以及可控负荷的规模化效益,实现多能源协调互补,有效消纳风电/光伏能源,降低煤耗量和减少污染排放,提高资源利用率和经济收益。

参考文献:

- [1] 姜磊. 虚拟电厂多目标并行优化调度研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.
- [2] 刘涤尘,彭思成,廖清芬,等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3023-3034.
- [3] 王婉璐,杨莉,王蕾,等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(21):45-52.
- [4] GU CH, XIANG Y, et al. Power-to-gas management using robust optimisation in integrated energysystems [J]. Applied Energy, 2019, 236:681-689.
- [5] WAND D, PARKINSION S, MIAO W, et al. Hierarchical market integration of responsive loads as spinning reserve [J]. Applied Energy, 2013, 37(21):229-238.
- [6] 陈磊,徐飞,王晓,等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报,2015,17:4283-4290.
- [7] 田君杨,韦化,白晓清. 半定规划优潮流的并行计算方法[J]. 电网技术,2014,1:175-180.
- [8] 左丽霞,余愿,孙惠娟. 电力系统动态环境经济调度模型研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(3):134-142.
- [9] 王晓海,乔颖,鲁宗相,等. 供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J]. 中国电机工程学报,2015,9:2112-2119.
- [10] ZHOU B, LIU X, CAO Y, et al. Optimal scheduling of virtual power plant with battery degradation cost[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2016, 10(3):712-725.
- [11] 李佳佳,胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术,2015,11:3286-3291.
- [12] 彭春华,姜磊,刘君,等. 采用极限学习机预测优化的超高压输电线路畸变电场屏蔽[J]. 电网技术,2017,41(11):3655-3662.
- [13] LENNARD-JONES J E. Cohesion[J]. Proceedings of the physical society, 1931, 43(5):461-482
- [14] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [15] CPENG, L XU, X GONG, et al. Molecular evolution based dynamic reconfiguration of distribution networks with DGs considering three-phase balance and switching times[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2019, DOI: 10.1109/TII.2018.2866301.

Optimization Scheduling of Integrated Energy System Based on Parallel Molecular Differential Evolution Algorithm

Fu Runwei¹, Jiang Lei², SunHuijuan³

(1. Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250022, China;

3. School of Electrical & Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to give full play to the scale benefits of clean energy, combine heat and power generation, electric heating energy storage system and controllable load, and to realize the coordination and complementarity of multiple energy sources, this paper establishes the model of combined optimal dispatch of heat and power in the integrated energy system. Based on the idea of bi-level parallelization and the principle of intermolecular interaction potential, a parallel molecular differential evolution algorithm is proposed, which can effectively balance depth and speed of optimization. Thus, the integrated energy system scheduling model can be solved quickly and accurately. Finally, the validity and superiority of the proposed method are verified by the calculation of the integrated energy system scheduling model.

Key words: integrated energy system; parallel molecular differential evolution algorithm; heat and power cogeneration; multi-objective optimization dispatch