

空间耦合粒子群优化算法及峰谷电价下 IES-CCHP 区域联合调度

周任军,晁岱旭,李新军,刘嫣然,许阳,孙洪

(长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘要: 综合能源系统中电力、天然气和热力系统之间的交互影响具有一定的相关性。考虑能源间转换关系以及系统对分时电价的响应,以最小化购售电计划交易成本、燃料成本和排放污染气体所产生的环境成本为目标,建立峰谷电价下冷热电联供(CCHP)系统区域联合环保经济调度模型。为解决粒子群优化算法求解模型时存在的优化效率低、易陷入局部最优、计算结果随机性强等问题,提出一种空间耦合粒子群优化算法。在粒子寻优多维参数空间上,通过引入耦合协调数学模型将各维参数有效耦合,从而使所有参数从总体上同时趋向最优解。仿真结果表明,相比经典粒子群优化算法和改进粒子群优化算法,空间耦合粒子群优化算法有较强的全局搜索能力和更可靠的优化计算结果;所提 CCHP 系统的联合调度模型能有效促进能源的高效利用、电力的经济调度和节能减排。

关键词: 综合能源系统; 分时电价; 空间耦合粒子群优化算法; 冷热电联供; 环保经济调度

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.002

0 引言

在能源需求大幅增长与环境保护日益迫切的双重压力下,综合能源系统 IES(Integrated Energy System)将成为未来 30~50 年能源领域的主要承载形式^[1]。伴随节能减排政策的促进以及天然气成本的降低,冷热电联供 CCHP(Combined Cold Heat and Power)技术作为区域供冷/热系统已得到示范和推广^[2-3]。其研究以热能的综合梯级利用为主线,考虑系统的经济性以及用户的电力需求,遵循冷热电联产系统的集成原则^[4];为考虑天然气与电力系统之间的相互影响,研究了考虑天然气管道运行约束的电力风险评估^[5]和风电随机性的电力机组日前调度^[6]。这些研究或重点考虑电力、热力系统联合,或考虑电力、天然气联合,但均未综合考虑其三者的联合,然而这却是在 IES 背景下能源领域最受关注的关键技术。同时作为 IES 中的主要能源网络,电/气/热转换环节是通过 CCHP 机组实现的,通过利用 CCHP 输出与输入间的能源集线器模型^[7],能够刻画出电力、天然气和热力系统间的交互影响。

CCHP 接入电网运行时既从主网购电,又可以向主网售电。为获得最优经济效益将响应分时电价改变其供能方案^[8],尤其是购售电交易计划。而峰谷电价能激励用户积极参与削峰填谷^[9],达到需求侧管理的目的。目前,峰谷定价问题主要针对只消耗电能的一般电力用户^[10-11],对于 CCHP 这类具有

灵活调节供能方案的用户鲜见报道。为此,在传统考虑燃料成本和排放污染气体所产生的环境成本的基础上,计及峰谷电价下的购售电成本不仅能够使 CCHP 参与需求侧管理,而且能促使其获得更大的经济效益。

近年来,粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)算法由于其快速、简便的优点已广泛应用于函数优化、神经网络训练、组合优化、模式识别、电力系统优化等领域^[12-13]。随着融入改进的混沌策略^[14]、采用自适应变异算子的自调节^[15]、随机黑洞处理与聚类^[16]等方法引入了全局搜索信息,为其增加了了解的多样性,在一定程度上改善了过早收敛的缺陷。但优化效率低,效果不太令人满意。一种改进的空间粒子群优化 SPSO(Space Particle Swarm Optimization)算法通过高度参数的引入^[17],与速度、位置共同组成一个三维寻优参数空间,促使粒子改变寻优视角,改善了局部最优问题。然而多维空间并不同于二维平面,粒子的寻优方向随机性很大。为了有效地将每个粒子每一维参数彼此联系起来,使所有参数从总体上同时趋向最优解,达到将寻优视角指向全局极值点的目的,引入了一种耦合协调数学模型,提出空间耦合粒子群优化 SC-PSO(Space-Coupling Particle Swarm Optimization)算法。

1 峰谷电价下 IES-CCHP 区域联合环保经济调度模型

1.1 CCHP 能源集线器模型

在 IES 中,可用能源集线器来描述其中的能源转换关系,其基本结构如图 1 所示。典型的 CCHP 能

收稿日期:2016-04-27;修回日期:2016-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277016)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277016)

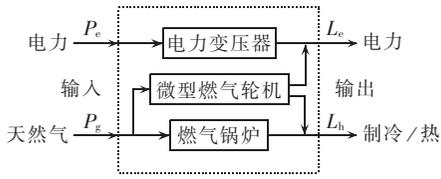


图 1 能源集线器典型结构

Fig.1 Typical structure of energy hub

源集线器模型由电力变压器、微型燃气轮机 MT (MicroTurbine) 和燃气锅炉 GB (Gas Boiler) 共同构成。图中, 输入环节包括电能和天然气, 其中电能直接输入到变压器, 而天然气同时输入到微型燃气轮机和燃气锅炉; 输出环节包含了电能和冷热能两部分, 其中所输出的电能由变压器和微型燃气轮机供给, 而所输出的冷热能则由燃气锅炉和微型燃气轮机共同产生。由此可得如式(1)所示的多输入多输出的功率转换关系式, 其中的耦合系数不仅与转换装置的转换效率有关, 还与能源在不同转换装置中的分配比例有关, 因此引入分配系数 ν_{MT} ($0 \leq \nu_{MT} \leq 1$), 则 $\nu_{MT}P_g$ 表示输入微型燃气轮机中的天然气, $(1-\nu_{MT})P_g$ 表示输入燃气锅炉中的天然气。

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta^T & \nu_{MT}\eta_{ge}^{MT} \\ 0 & \nu_{MT}\eta_{gh}^{MT} + (1-\nu_{MT})\eta^{GB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, η_{ge}^{MT} 和 η_{gh}^{MT} 分别为天然气经过微型燃气轮机转化为电力和热能的转换效率; η^T 为变压器效率; η^{GB} 为燃气锅炉的制冷和制热的能效比; P_e 和 P_g 分别为 CCHP 与电网和天然气网络的能量交互值; L_e 和 L_h 分别为 CCHP 所供应的电负荷和热负荷。

1.2 峰谷电价下 CCHP 的购售电成本 f_1

峰谷电价能够激励用户积极参与削峰填谷。峰谷定价时, CCHP 系统较统一电价所得经济效益是激励其调节用能的主要动力。因此 CCHP 系统为获取最大经济效益将响应电价改变其供能方案, 尤其是购售电交易计划。购售电成本受电价和购售电功率的相互影响, 包括买电带来的成本和卖电带来的收益。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{b,t} + C_{s,t}}{2} P_{link,t} + \frac{C_{b,t} - C_{s,t}}{2} |P_{link,t}| \right) \quad (2)$$

其中, $C_{b,t}$ 、 $C_{s,t}$ 分别为时段 t 购电和售电的价格; $P_{link,t}$ 为 CCHP 系统在时段 t 的购售电功率, 为正表示 CCHP 系统向电网买电, 为负表示向电网售电; T 为总时段数。

1.3 燃料成本模型 f_2

系统总燃料花费 f_2 (单位为 \$) 可表示为:

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i(t)) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(H_k(t)) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(P_j(t), H_j(t)) \right] \quad (3)$$

$$C_i(P_i(t)) = a_i + b_i P_i(t) + c_i P_i^2(t)$$

$$C_k(H_k(t)) = a_k + b_k H_k(t) + c_k H_k^2(t)$$

$$C_j(P_j(t), H_j(t)) = a_j + b_j P_j(t) + c_j P_j^2(t) + d_j H_j(t) + e_j H_j^2(t) + f_j P_j(t) H_j(t)$$

其中, $C_i(P_i(t))$ 为第 i 台发电机组在时段 t 产生的燃料成本 (单位为 \$); $C_k(H_k(t))$ 为第 k 台供冷热机组在时段 t 产生的燃料成本 (单位为 \$); $C_j(P_j(t), H_j(t))$ 为第 j 台 CCHP 机组在时段 t 内产生的燃料成本 (单位为 \$); $a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j$ 为第 j 台机组的燃料消耗函数系数; N_p, N_c, N_h 分别为仅发电、CCHP 和仅供冷热机组的台数。

1.4 环境成本模型 f_3

(1) 仅发电机组部分。

仅发电机组在时段 t 内产生的环境成本 f_{31} (单位为 \$) 可表示为:

$$f_{31}^t = \sum_{i=1}^{N_p} [\omega_C E_{CO_2i}^p(P_i(t)) + \omega_S E_{SO_2i}^p(P_i(t)) + \omega_N E_{NO_xi}^p(P_i(t))] \quad (4)$$

$$E_{CO_2i}^p(P_i(t)) = 0.01 [\alpha_i + \beta_i P_i(t) + \gamma_i P_i^2(t)] + \varepsilon_i \exp(\lambda_i P_i(t))$$

$$E_{SO_2i}^p(P_i(t)) = \varepsilon_{SC}^p E_{CO_2i}^p(P_i(t))$$

$$E_{NO_xi}^p(P_i(t)) = \varepsilon_{NC}^p E_{CO_2i}^p(P_i(t))$$

(2) 仅供冷热机组部分。

仅供冷热机组在时段 t 内产生的环境成本 f_{32} (单位为 \$) 可表示为:

$$f_{32}^t = \sum_{i=1}^{N_h} [\omega_C E_{CO_2i}^h(P_i(t)) + \omega_S E_{SO_2i}^h(P_i(t)) + \omega_N E_{NO_xi}^h(P_i(t))] \quad (5)$$

$$E_{CO_2i}^h(P_i(t)) = 0.01 [\alpha_i + \beta_i P_i(t) + \gamma_i P_i^2(t) + \varepsilon_i \exp(\lambda_i P_i(t))] / \rho$$

$$E_{SO_2i}^h(P_i(t)) = \varepsilon_{SC}^h E_{CO_2i}^h(P_i(t))$$

$$E_{NO_xi}^h(P_i(t)) = \varepsilon_{NC}^h E_{CO_2i}^h(P_i(t))$$

(3) CCHP 机组部分。

CCHP 机组在时段 t 内产生的环境成本 f_{33} (单位为 \$) 可表示为:

$$f_{33}^t = \sum_{i=1}^{N_c} [\omega_C E_{CO_2i}^c(P_i(t)) + \omega_S E_{SO_2i}^c(P_i(t)) + \omega_N E_{NO_xi}^c(P_i(t))] \quad (6)$$

$$E_{CO_2i}^c(P_i(t)) = 0.01 (1 + 1/\rho) [\alpha_i + \beta_i P_i(t) + \gamma_i P_i^2(t) + \varepsilon_i \exp(\lambda_i P_i(t))]$$

$$E_{SO_2i}^c(P_i(t)) = \varepsilon_{SC}^c E_{CO_2i}^c(P_i(t))$$

$$E_{NO_xi}^c(P_i(t)) = \varepsilon_{NC}^c E_{CO_2i}^c(P_i(t))$$

综上所述, 系统在整个调度时段 T 内产生的环境总成本 f_3 (单位为 \$) 为:

$$f_3 = \sum_{t=1}^T (f_{31}^t + f_{32}^t + f_{33}^t) \quad (7)$$

其中, $\omega_C, \omega_S, \omega_N$ 分别为 $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 单位排放量所对应的环境价值与污染排放罚款之和; $E_{\text{CO}_2 i}^p(P_i(t))$ 、 $E_{\text{SO}_2 i}^p(P_i(t))$ 、 $E_{\text{NO}_x i}^p(P_i(t))$ 分别为第 i 台发电机组的 $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 排放模型(单位为 t/h); $\alpha_i, \beta_i, \lambda_i, \gamma_i, \varepsilon_i$ 为第 i 台机组的 CO_2 气体排放参数; ρ 为供热当量性能系数^[10]; $\varepsilon_{\text{SC}}^p, \varepsilon_{\text{NC}}^p$ 为仅发电机组部分的碳排放折算系数; $E_{\text{CO}_2 i}^c(P_i(t))$ 、 $E_{\text{SO}_2 i}^c(P_i(t))$ 、 $E_{\text{NO}_x i}^c(P_i(t))$ 分别为第 i 台 CCHP 机组的 $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 排放模型(单位为 t/h); $\varepsilon_{\text{SC}}^c, \varepsilon_{\text{NC}}^c$ 为 CCHP 机组部分的碳排放折算系数; $E_{\text{CO}_2 i}^h(P_i(t))$ 、 $E_{\text{SO}_2 i}^h(P_i(t))$ 、 $E_{\text{NO}_x i}^h(P_i(t))$ 分别为第 i 台仅供冷热机组的 $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 排放模型(单位为 t/h); $\varepsilon_{\text{SC}}^h, \varepsilon_{\text{NC}}^h$ 为仅供冷热机组部分的碳排放折算系数。

1.5 IES-CCHP 联合环保经济调度模型

1.5.1 目标函数

IES-CCHP 环保经济优化调度的目标是,在整个调度时段 T 内,在满足 CCHP 能源集线器模型条件下,使系统购售电成本、燃料成本与环境成本之和达到最小值。因此,其优化目标函数可表示为:

$$f = \min f_{\text{all}} = \min (f_1 + f_2 + f_3) \quad (8)$$

其中, f 为系统的综合成本; f_1, f_2 和 f_3 分别如式(2)、式(3)、式(7)所示。

1.5.2 约束条件

(1) 购售电功率约束。

$$P_{\text{link}}^{\min} < P_{\text{link},t} < P_{\text{link}}^{\max} \quad (9)$$

其中, $P_{\text{link}}^{\min}, P_{\text{link}}^{\max}$ 分别为 CCHP 系统在时段 t 购售电功率的最小值和最大值。

(2) 各机组出力约束。

$$\begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} & i=1, 2, \dots, N_p \\ P_j^{\min} \leq P_j(t) \leq P_j^{\max} & j=1, 2, \dots, N_c \\ H_j^{\min} \leq H_j(t) \leq H_j^{\max} & j=1, 2, \dots, N_c \\ H_k^{\min} \leq H_k(t) \leq H_k^{\max} & k=1, 2, \dots, N_h \end{cases} \quad (10)$$

其中, P_i^{\min}, P_i^{\max} 分别为第 i 台仅发电机组的有功功率的下限值、上限值; P_j^{\min}, P_j^{\max} 分别为第 j 台 CCHP 机组的有功功率的下限值、上限值; H_j^{\min}, H_j^{\max} 分别为第 j 台 CCHP 机组的供热出力的下限值、上限值; H_k^{\min}, H_k^{\max} 分别为第 k 台仅供冷热机组的供热出力的下限值、上限值。

(3) 系统功率平衡约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_p} P_i(t) + \sum_{j=1}^{N_c} P_j(t) = P_D(t) \\ \sum_{j=1}^{N_c} H_j(t) + \sum_{k=1}^{N_h} H_k(t) = H_D(t) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $P_D(t), H_D(t)$ 分别为时段 t 的总电负荷和总热负荷。

(4) 系统许可的污染气体排放约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N E_{\text{CO}_2 i} \leq E_{Cz} \\ \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N E_{\text{SO}_2 i} \leq E_{Sz} \\ \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N E_{\text{NO}_x i} \leq E_{Nz} \\ N = N_p + N_h + N_c \end{cases} \quad (12)$$

$$E_{\text{CO}_2 i} = E_{\text{CO}_2 i}^p(P_i(t)) + E_{\text{CO}_2 i}^c(P_i(t)) + E_{\text{CO}_2 i}^h(P_i(t))$$

$$E_{\text{SO}_2 i} = E_{\text{SO}_2 i}^p(P_i(t)) + E_{\text{SO}_2 i}^c(P_i(t)) + E_{\text{SO}_2 i}^h(P_i(t))$$

$$E_{\text{NO}_x i} = E_{\text{NO}_x i}^p(P_i(t)) + E_{\text{NO}_x i}^c(P_i(t)) + E_{\text{NO}_x i}^h(P_i(t))$$

其中, $E_{\text{CO}_2 i}, E_{\text{SO}_2 i}, E_{\text{NO}_x i} (i=1, 2, \dots, N)$ 分别为第 i 台机组排放 $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 的总量; E_{Cz}, E_{Sz}, E_{Nz} 分别为 $\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 的配额排放量; N 为系统总机组数。

2 耦合协调函数

2.1 耦合意义及模型

耦合具有多方面的意义^[18]:物理学指 2 个或 2 个以上的系统或运动方式之间通过各种相互作用而彼此影响以致联合起来;电子学中指能量从一种介质(例如一根金属线、光导纤维)传播到另一种介质的过程,是一种能量传递过程;概率论中耦合被认为是关联结构,是一种处理统计中随机变量相关性问题的方法;从经济学意义来看,耦合是为了降低耗费、提高效率。

借用耦合度函数,可以揭示 n 个(不失一般性,假设 $n=3$)目标函数彼此之间相互作用、相互影响的内在协同机理。耦合度函数表示为:

$$C_i = \left[\frac{f(1) \times f(2) \times f(3)}{\prod_{i,j} (f(i) + f(j))} \right]^{1/3} \quad (13)$$

其中, $i, j=1, 2, 3, i \neq j$; C_i 为耦合度,取值范围为 $[0, 1]$ 。 C_i 值越大,表明耦合度越好,说明系统之间有序配合,紧密相关。

2.2 耦合协调模型

耦合度函数的缺点是仅仅能够描述系统之间协调发展的程度,但是无法确定系统是在较高的水平上相互促进,还是在较低的水平上紧密联系。因此,进一步引入耦合协调函数,不仅能够反映系统之间的协调程度,还能体现协调发展水平的阶段性。耦合协调度可表示为:

$$R = \left[\frac{f(1) \times f(2) \times f(3)}{\left(\frac{f(1) + f(2) + f(3)}{3} \right)^3} \times T_1 \right]^{1/3} \quad (14)$$

其中, R 为耦合协调度; T_1 为综合评价指数,可由式(15)表示。

$$T_1 = \alpha f(1) + \beta f(2) + \gamma f(3) \quad (15)$$

其中, α, β, γ 为权重系数,分别表示 $f(1), f(2), f(3)$ 的贡献量,且有 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

R 值越大,反映了系统之间在高水平上相互协调。本系统中 $f(1)$ 、 $f(2)$ 、 $f(3)$ 的贡献量一样,令 $\alpha=\beta=\gamma=1/3$ 。按照耦合协调度的大小可以划分不同耦合协调发展阶段。设定耦合协调度 R ,当 $0 < R < 0.3$ 时,为低级耦合协调发展阶段; $0.3 \leq R < 0.5$ 时,为中级耦合协调发展阶段; $0.5 \leq R < 0.8$ 时,为高级耦合协调发展阶段; $0.8 \leq R < 1$ 时,为极度耦合协调发展阶段。

3 SC-PSO 算法

3.1 SPSO 算法及其高度参数

在 PSO 算法中,每个优化问题的未知解都可以作为搜寻范围内的一个点,即粒子。每个粒子都对应一个取决于待优化函数的适应度值。所有粒子移动的方向和距离都是由其速度决定的,并且群体中的所有粒子均跟随最优粒子在一个平面解域内搜寻。每次速度和位置的更新原则分别如式(16)、(17)所示。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (16)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (17)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m$, m 为种群规模; $d=1, 2, \dots, D$, D 为待优化变量的个数; c_1 和 c_2 为学习因子; v_{id}^k 、 v_{id}^{k+1} 分别为粒子 i 对应第 d 个待优化变量在第 k 次、第 $k+1$ 次修正时对应的速度; x_{id}^k 、 x_{id}^{k+1} 分别为粒子 i 对应第 d 个变量在第 k 次、第 $k+1$ 次修正时对应的位置; p_{id}^k 为粒子 i 对应第 d 个待优化变量在第 k 次修正时个体最优位置; p_{gd}^k 为整个群体对应第 d 个变量在第 k 次修正时全局最优位置; r_1 、 r_2 为介于 0 与 1 之间均匀分布的随机数; ω 为惯性权重。

SPSO 算法通过对每个粒子优化变量矩阵的每一分量附加一组高度参数,使得每个待优化变量在由位置 x 、速度 v 和高度 h 组成的全新参数空间域内寻优,即 $x-v-h$ 空间。其寻优过程就像在绵延山群中,站在每个山腰均容易得到所在山头极值点,通过增加一维高度参数的扰动,能促使粒子改变寻优视角,便于寻求整个山脉的最高处。此时,位置 x_{ij} 的修正方式发生了变化,按式(18)来更新。

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} + h_{ij}^{k+1} \quad (18)$$

其中, h_{ij}^{k+1} 为粒子 i 对应第 j 个变量在第 $k+1$ 次修正时对应的高度。

高度参数 h 的具体修正格式如式(19)所示。

$$\begin{cases} h_{ij}^{k+1} = h_{ij}^k + l_j (f_{\text{fitness},i}^k - f_g^k) / (f_{\text{av}}^k - f_g^k) & f_{\text{fitness},i}^{k+1} = f_{\text{fitness},i}^k \\ h_{ij}^{k+1} = h_{ij}^k & f_{\text{fitness},i}^{k+1} \neq f_{\text{fitness},i}^k \end{cases} \quad (19)$$

其中, $f_{\text{fitness},i}^k$ 为粒子 i 在第 k 次修正时所对应的适应度值; l_j 为第 j 个变量对应的可行区间的长度; f_g^k 为所有粒子在第 k 次修正时所对应的最优适应度值; f_{av}^k 为所有粒子在第 k 次修正时所对应的平均适应度值。

3.2 SC-PSO 算法

多维空间并不同于二维平面,粒子的寻优方向随机性很大。从式(16)和式(19)可看出,速度 v 和高度 h 每次更新时都是按照各自的方式进行的。而 x 、 v 和 h 三者每次更新时相互影响的关系并不能看出来。为此在构成的全新的三维空间里引入上述耦合协调模型如式(13)所示,有效地将每个粒子每一维参数彼此联系起来,使所有参数从总体上同时趋向最优解,达到将寻优视角指向全局极值点的目的。进而,探索一种新型的 SC-PSO 算法。由于速度 v 是时间的函数,此 SC-PSO 算法不仅体现了空间上的联系,而且从时间尺度上也进行了一定关联。

另一方面,从 PSO 算法的内部运动来看,当群体中的所有粒子对应的每一维参数变量跟随最优粒子对应的参数在一个全新的空间解域内搜寻时,可有效地将每一维参数变量彼此联系起来,从而使所有参数从总体上同时趋向最优解,而不是杂乱分裂地仅根据每一维参数变量的最优解进行毫无目的和联系的寻优。SC-PSO 算法不仅提高了全局收敛性,而且从根本上减少了算法的无效路径,提高了效率,大幅降低了随机性。

4 算例仿真结果分析

4.1 算例与参数处理

以某地方的 IES-CCHP 系统为例,其中输入环节包括电能和天然气;负荷包含电负荷、热(冷)负荷,系统各时段电、热(冷)负荷需求如图 2 所示;各发电机的基本参数如表 1 所示,其中 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 为仅供电机组, C_5 和 C_6 为 CCHP 机组, H_7 为仅供冷热机组;取粒子种群规模 $m=40$,学习因子 c_1 和 c_2 均取 1.5,惯性权重取 $\omega_{\max}=0.9$ 、 $\omega_{\min}=0.4$, R 取高级耦合阶段指标 0.85,最大迭代次数为 100 次,初始惩罚系数 μ 取 100; CO_2 排放参数如表 2 所示; SO_2 排放参数如表 3 所示; NO_x 排放参数如表 4 所示;按电力行业排放标准设定各类污染气体单位排放量的环境价值与相应罚款如表 5 所示;某地 CCHP 峰谷电价如表 6 所示。

4.2 仿真结果分析

为了对比明显,选取负荷需求最大的时段进行对比分析,此时电负荷为 293 kW,热负荷为 548 kW。针对上述案例分别采用 PSO 算法、SPSO 算法和 SC-

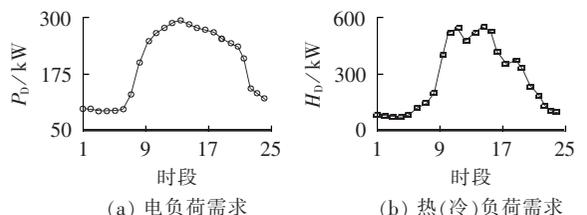


图 2 电和热负荷需求情况

Fig.2 Electricity and heat demands

表 1 CCHP 机组参数
Table 1 Parameters of CCHP units

发电机	a	b	c	d	e	f	P_{max}/kW	P_{min}/kW	H_{max}/kW	H_{min}/kW
G ₁	589.8653	19.0100	0.021	0	0	0	55	5	—	—
G ₂	462.3895	17.2230	0.029	0	0	0	65	5	—	—
G ₃	988.5600	42.6780	0.035	0	0	0	100	5	—	—
G ₄	1189.4125	37.5580	0.037	0	0	0	120	5	—	—
C ₅	2757.1591	35.2140	0.104	2.985	0.019	0.047	100	5	200	0
C ₆	1186.2356	36.4447	0.042	0.506	0.021	0.037	60	5	190	0
H ₇	1023.2561	0	0	1.996	0.034	0	—	—	250	0

表 2 各机组 CO₂ 排放参数
Table 2 CO₂ emission parameters of units

发电机	α_1	β_1	γ_1	ε_1	λ_1
G ₁	14.32	-19.51	22.91	0	0
G ₂	8.95	-21.17	19.96	0	0
G ₃	15.16	-18.03	16.14	0	0
G ₄	18.11	-12.20	12.17	0	0
C ₅	14.90	-18.50	15.94	0	0
C ₆	20.80	-19.80	17.51	0	0
H ₇	18.10	-19.80	18.09	0	0

表 3 各机组 SO₂ 排放参数
Table 3 SO₂ emission parameters of units

发电机	α_2	β_2	γ_2	ε_2	λ_2
G ₁	1.23	-1.72	1.95	0.006	2.95
G ₂	0.76	-1.87	1.75	0.015	3.57
G ₃	1.32	-1.63	1.47	0.00003	7.50
G ₄	1.65	-1.14	1.12	0.062	2.41
C ₅	1.32	-1.64	1.50	0.00003	7.62
C ₆	1.96	-1.89	1.80	0.0003	6.83
H ₇	1.61	-2.04	1.87	0.0006	7.13

表 4 各机组 NO_x 排放参数
Table 4 NO_x emission parameters of units

发电机	α_3	β_3	γ_3	ε_3	λ_3
G ₁	4.09	-5.54	6.49	0.0002	2.86
G ₂	2.54	-6.05	5.64	0.0005	3.33
G ₃	4.26	-5.09	4.57	0.00001	8
G ₄	5.33	-3.55	3.38	0.002	2
C ₅	4.26	-5.09	4.57	0.00001	8
C ₆	6.13	-5.56	5.15	0.00001	6.67
H ₇	5.02	-6.01	5.65	0.00002	7.03

表 5 电力行业污染气体排放标准
Table 5 Pollutant emission specifications of electric power industry

污染气体	环境价值/(\$·kg ⁻¹)	排放罚款/(\$·kg ⁻¹)
CO ₂	0.002875	0.00125
SO ₂	0.75	0.125
NO _x	1.00	0.25

PSO 算法进行优化,三者优化过程对比见图 3。

从图 3 中可以看出,SC-PSO 算法在一定程度上比 SPSO 算法更好地缓解了 PSO 算法容易陷入局部最优且难跳出来,导致过早收敛的缺陷。在收敛性能方面,PSO 算法在迭代不到 10 次就陷入了局部最优而且不能自我调整跳出局部最优区域;SPSO 算法

表 6 某地 CCHP 机组分时电价
Table 6 TOU prices of a regional CCHP system

时段	价格/[元·(kW·h) ⁻¹]		
	购电	售电	
峰时段	10:00—15:00, 18:00—21:00	1.3222	1.1745
平时段	07:00—10:00, 15:00—18:00, 21:00—23:00	0.8395	0.7785
谷时段	23:00 至次日 07:00	0.3818	0.4045

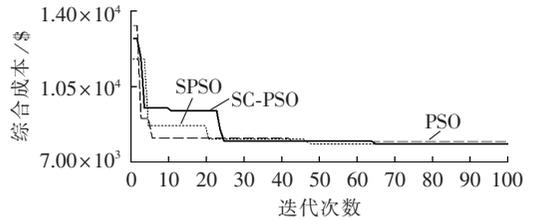


图 3 3 种算法的收敛特性对比
Fig.3 Comparison of convergence among three algorithms

虽然在前面部分跳出了局部最优区域,但是也在不到 50 次迭代又陷入了新的局部最优;而 SC-PSO 算法出现了非常明显多次自我调整的现象,跳出局部最优区域,而且也在寻优不到 60 次就找到了全局最优解,获得了更好、更精确的目标值,这也进一步展现了其良好的收敛特性和高效稳定的寻优性能,较好地解决 PSO 算法容易陷入早熟且难跳出局部最优区域的缺陷。这是由于 SC-PSO 算法通过引入耦合协调模型,有效地将每个粒子的每一维变量彼此联系起来,使所有变量从总体上同时趋向最优解,从而使得粒子易于跳出局部最优区域,同时也避免了其他跟随的粒子陷入局部最优,提高了全局收敛性和效率,增强了全局寻优能力。对于该时段,在同等条件下分别对各算法独立计算 50 次,得到其优化结果分布图如图 4 所示。

从图 4 中可以看出:SC-PSO 算法优化结果的随机性明显小于 SPSO 算法优化结果的随机性;对 50 次独立计算的结果取平均值,可得各自的该时段综合成本优化结果如表 7 所示。

从表 7 中可以看出:PSO 算法优化结果的随机性最大,SPSO 算法优化结果的随机性次之,SC-PSO 算法优化结果的随机性最小。这也说明了 SC-PSO

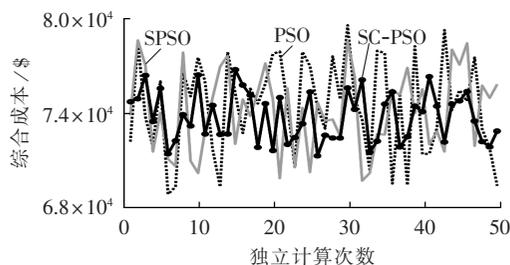


图 4 3 种算法 50 次独立计算结果分布

Fig.4 Results of 50 independent calculations for three algorithms

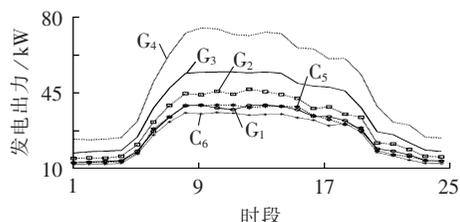
表 7 3 种算法 50 次独立计算的平均总成本

Table 7 Statistics of 50 independent calculations for three algorithms

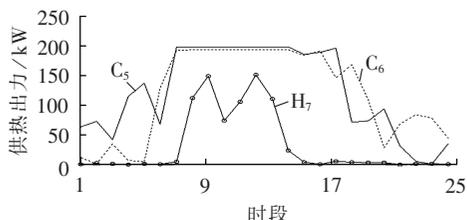
算法	最大负荷时段综合成本 / \$			
	最大值	最小值	平均值	标准差
PSO	76577.3	74896.3	75489.2	684.9
SPSO	75602.5	74534.8	74796.7	447.8
SC-PSO	74552.4	74218.9	74113.8	289.1

算法的寻优性能明显优于 PSO 算法,一定程度上比 SPSO 算法好。同时,从多次计算所得到的平均综合成本来看,融入耦合协调后的 SC-PSO 算法所求得平均综合成本最小,即更经济环保,其寻优所求得的结果更加合理,进一步体现了该算法的优越性和有效性。

从图 5 所示机组出力分配的情况来看,在充分考虑峰谷分时电价对购售电成本的影响下,利用 CCHP 机组的能源集线器模型,在电、热(冷)负荷需求增加时,优先考虑增加 CCHP 机组的出力配额,从而降低系统的综合成本,使系统能够高效、节能、环保运行。



(a) 发电机组出力



(b) 供热机组出力

图 5 机组出力优化结果

Fig.5 Optimized outputs of different units

5 结论

充分考虑 IES 中电力、热力系统和天然气之间的交互影响,建立了 CCHP 系统区域联合环保经济

调度模型,拓宽了 IES 中能量利用的相关性研究和计算思路。

在传统考虑燃料成本和排放污染气体所产生的环境成本的基础上,计及峰谷电价下的购售电成本不仅能够使 CCHP 参与需求侧管理,而且促使其获得更大的经济效益。

引入耦合协调数学模型而提出的 SC-PSO 算法,可针对性地解决 PSO 算法固有的随机性强、低效、容易陷入局部收敛而早熟的问题。仿真结果表明该方法不仅易于跳出早熟区间,增强全局寻优能力,而且提高了全局收敛性和效率,降低了随机性。

参考文献:

- [1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
JIA Hongjie,WANG Dan,XU Xiandong,et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):198-207.
- [2] 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(20):82-87,143.
JING Youyin,BAI He,ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(20):82-87,143.
- [3] 朱建文,石琳. 天然气冷热电联产系统的应用与发展[J]. 华电技术,2014,36(10):73-76,80.
ZHU Jianwen,SHI Lin. Application and development of natural gas CCHP production system[J]. Huadian Technology,2014,36(10):73-76,80.
- [4] 冯志兵. 燃气轮机冷热电联产系统集成理论与特性规律[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2006.
FENG Zhibing. Integration principia and performance of CCHP with gas turbine[D]. Beijing:Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences,2006.
- [5] SAHIN C,SHAHIDEHPOUR M,ERKMEN I. Generation risk assessment in volatile conditions with wind,hydro,and natural gas units[J]. Applied Energy,2012,96(3):4-11.
- [6] ALABDULWAHAB A,ABUSORRAH A,ZHANG X,et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015,6(2):606-615.
- [7] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
XU Xiandong,JIA Hongjie,JIN Xiaolong,et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3634-3642.
- [8] 董军,张晓虎,李春雪,等. 自动需求响应背景下考虑用户满意度的分时电价最优制定策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):1-7.
DONG Jun,ZHANG Xiaohu,LI Chunxue,et al. Optimal TOU pricing strategy considering user satisfaction in automated demand response background[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):1-7.
- [9] 崔强,王秀丽,王维洲. 考虑风电消纳能力的高载能用户错峰峰

- 谷电价研究[J]. 电网技术,2015,39(4):946-952.
- CUI Qiang,WANG Xiuli,WANG Weizhou. Stagger peak electricity price for heavy energy-consuming enterprises considering improvement of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2015,39(4):946-952.
- [10] 郭联哲,谭忠富,李晓军. 基于用户响应下的分时电价优化设计模型与方法[J]. 电网技术,2006,30(5):24-28.
- GUO Lianzhe,TAN Zhongfu,LI Xiaojun. Demand response based model and method for optimal design of time-of-use electricity price[J]. Power System Technology,2006,30(5):24-28.
- [11] 苏海锋,梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):17-22.
- SU Haifeng,LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(6):17-22.
- [12] PEHLIVANOGLU Y V. A new particle swarm optimization method enhanced with a periodic mutation strategy and neural networks [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2013,17(3):436-452.
- [13] LI P,XU D,ZHOU Z Y,et al. Stochastic optimal operation of microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):66-73.
- [14] 沈茂亚,丁晓群,王宽,等. 自适应免疫粒子群算法在动态无功优化中应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(1):31-35.
- SHEN Maoya,DING Xiaoqun,WANG Kun,et al. Application of adaptive immune PSO in dynamic reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(1):31-35.
- [15] 邹恩,辛建涛,方仕勇,等. ICPSO 算法及其在经济负荷分配中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(4):19-24.
- ZOU En,XIN Jiantao,FANG Shiyong,et al. Improved chaotic particle swarm optimization algorithm and its application in economic load dispatch[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2012,24(4):19-24.
- [16] 刘静,罗先觉. 采用多目标随机黑洞粒子群优化算法的环境经济发电调度[J]. 中国电机工程学报,2010,30(34):105-111.
- LIU Jing,LUO Xianjue. Environmental economic dispatching adopting multiobjective random black-hole particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(34):105-111.
- [17] 周任军,李绍金,李红英,等. 空间粒子群优化算法及其在电力系统环保经济负荷分配中的应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):7-12.
- ZHOU Renjun,LI Shaojin,LI Hongying,et al. Space particle swarm optimization algorithm and its application in environmental & economic load distribution of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):7-12.
- [18] 杜晖. 基于耦合关系的学术信息资源深度聚合研究[D]. 武汉:武汉大学,2013.
- DU Hui. Research on in-depth aggregation of academic information resource on the basis of coupling relationships[D]. Wuhan:Wuhan University,2013.

作者简介:



周任军

周任军(1964—),女,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化、电网规划与运行、新能源接入系统、风险及条件风险、分布式电源规划、低碳电力(**E-mail**:zrj0731@163.com);

晁岱旭(1988—),男,山西孝义人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与规划、冷热电联供系统优化(**E-mail**:tracycdx@163.com)。

SC-PSO algorithm and IES-CCHP regional joint dispatch with TOU price

ZHOU Renjun, CHAO Daixu, LI Xinjun, LIU Yanran, XU Yang, SUN Hong
(Smart Grids Operation and Control Key Laboratory of Hunan Province,
Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Since the interactions among electric power, gas and thermal system in IES(Integrated Energy System) appear certain interdependency, a regional joint environmental-economic dispatch model is established for the CCHP(Combined Cold Heat and Power) system with TOU(Time-Of-Use) electricity price, which considers the energy transform among different sources and the system response to TOU price, and takes the minimum total cost as its object, including electricity purchase/sale cost, fuel cost and environmental cost due to pollutant emission. Aiming at the low efficiency, local optimum and random calculative results of PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm, the SC-PSO(Space-Coupling PSO) algorithm is proposed, which introduces the coupled coordination math model to the multi-dimensional parameter space of PSO algorithm to effectively couple the parameters in different dimensions for the global optimum of all parameters at the same time. Simulative results show that, compared with classic PSO algorithm and improved PSO algorithm, SC-PSO algorithm has better global searching ability and more reliable optimization results; the proposed joint dispatch model for CCHP system is effective in high-efficient energy-source utilization, economic power dispatch and pollutant emission reduction.

Key words: integrated energy system; time-of-use electricity price; space-coupling particle swarm optimization algorithm; combined cold heat and power; environmental economic dispatch