

基于改进 NSGA-II 算法的 电-气-热综合能源系统多目标优化

蒋猛¹, 黄宇¹, 廖伟涵², 张简炼², 张又文², 郭创新²

(1. 贵州电网有限公司贵阳供电局, 贵州省 贵阳市 550002;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Multi-objective Optimization of Electricity-Gas-Heat Integrated Energy System Based on Improved NSGA-II Algorithm

JIANG Meng¹, HUANG Yu¹, LIAO Weihang², ZHANG Jianlian², ZHANG Youwen², GUO Chuangxin²

(1. Guiyang Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou Province, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

摘要: 随着电力、天然气和热力网络耦合紧密程度不断加深, 综合能源系统协同优化成为了新的研究热点。提出一种适用于含非凸约束条件的综合能源系统多目标优化问题的改进 NSGA-II 算法, 通过维护全局的帕累托最优解集提升解的搜索效率, 同时采用动态调整法, 提高在高维等式约束下找到可行解的概率。算例分析验证了该方法的有效性。

关键词: 综合能源系统(IES); 改进 NSGA-II 算法; 遗传算法; 多目标优化调度

ABSTRACT: With the development of interaction between electricity, natural gas and heat networks, collaborative optimization of integrated energy system has become a new research focus. An improved NSGA-II algorithm was proposed to solve the optimization problem of integrated energy system, which contained multiple objectives and nonconvex constraints, a global Pareto set maintenance method was proposed to improve the search efficiency of Pareto-optimal solutions. Dimensional reduction and dynamic adjustment were applied to improve the probability of finding feasible solutions under high-dimension equality constraints. An example was analyzed to prove the validity of the proposed method.

KEY WORDS: integrated energy system (IES); improved NSGA-II algorithm; genetic algorithm; multi-objective optimal scheduling

基金项目: 国家自然科学基金项目(51537010)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China (51537010).

0 引言

社会经济的快速发展带来了严重的能源和环境危机。为提升能源利用效率, 实现资源优化配置, 有学者提出了能源互联网的概念。在能源互联网中, 不同能源网络间实现了高度耦合, 系统运行的灵活性与协同性大幅提升^[1], 可以有效管理与调度不同形式的能量流动, 能够显著降低发电成本、提升环境效益^[2]。

综合能源系统(integrated energy system, IES)优化调度是能源互联网高效运行的重要技术支撑, 许多学者对综合能源系统的优化调度进行了深入研究。文献[3]从低碳环保角度出发, 构建了碳减排量评估模型与综合能源服务商和柔性负荷项目用户的主从博弈模型, 实现了计及综合能源服务商的低碳调度。文献[4]提出了一种考虑分布式天然气储存的鲁棒约束机组组合模型, 提高了集成系统的运行可靠性。文献[5]提出了一种协调随机模型, 考虑了需求响应电力和天然气网络最优调度的影响。文献[6]研究了相互依存的电力和天然气基础设施的协调调度。文献[7]提出了一种基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法, 实现了多微网经济性优化调度。文献[8]提出了一种基于记忆的遗传算法优化微电网分布式能源出力分配。文献[9]则采用鸟群优化算法, 实现风水协同

的运行优化，有效平抑了风电波动性对总功率的影响。上述研究仅考虑对单目标的优化，在实际应用中可能缺乏灵活性。多目标优化算法能够很好地解决这一问题。

近年来，陆续有学者将多目标优化方法应用于电力系统的各个方面。文献[10]基于免疫算法实现多目标无功优化。文献[11]采用改进和声搜索算法，综合考虑系统经济性和可靠性，建立了多目标电力系统规划模型。文献[12]考虑大规模风电接入系统的场景，以最大风电消纳和最小系统运行成本为目标，利用多目标差分算法进行求解。文献[13]建立了考虑短期电压稳定性和暂态稳定性的多目标动态无功优化模型。文献[14]基于多目标混合整数规划方法建立动态无功分配模型。

上述研究尚存在 2 点不足：一是综合考虑电-气-热网络的多目标优化问题未有涉及；二是多目标优化算法单位时间内获得的帕累托最优解数量较少。为此，本文提出了一种改进的 NSGA-II 算法，基于该算法求解电-热-气综合能源系统的多目标优化调度模型，能够显著增加单位时间内获得的帕累托最优解数量，提升求解效率。

1 综合能源系统优化调度模型

1.1 目标函数

本文提出的电-气-热综合能源系统优化调度模型，包含经济性与环保性 2 方面目标函数。

1) 经济性目标函数。

目标函数(1)使系统成本最低，包括非燃气机组运行费用和系统燃气供给成本：

$$\min C = \sum_{i \in N_{GU}} F_i^c(P_i) + \rho_{\text{gas}} \sum_w v_w \quad (1)$$

式中： P_i 为机组 i 的出力； ρ_{gas} 为燃气价格； v_w 为气井 w 的产气速率； N_{GU} 为燃气机组集合； $F_i^c(P_i)$ 为机组 i 的运行费用，

$$F_i^c(P_i) = a_{1,i} + a_{2,i}P_i + a_{3,i}(P_i)^2 \quad (2)$$

式中 $a_{1,i}, a_{2,i}, a_{3,i}$ 为多项式系数。

2) 环保性目标函数。

目标函数(3)使系统碳排放量最小：

$$\min C = u_{\text{coal}} \sum_{i \in N_{GU}} F_i^R(P_i) + u_{\text{gas}} \sum_w v_w \quad (3)$$

式中： u_{coal} 和 u_{gas} 分别为煤和燃气的碳排放系数； $F_i^R(P_i)$ 为非燃气机组 i 的煤消耗函数，

$$F_i^R(P_i) = b_{1,i} + b_{2,i}P_i + b_{3,i}(P_i)^2, \quad (4)$$

式中 $b_{1,i}, b_{2,i}, b_{3,i}$ 为多项式系数。

1.2 约束条件

1.2.1 能量系统约束条件

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C_{G,j}} P_i - \sum_{h_j \in C_{F,j}} f_{h_j} + \sum_{h_j \in C_{E,j}} f_{h_j} - D_j = 0 \quad (6)$$

$$f_{h_j} = (\theta_h - \theta_j) / x_{h_j} \quad (7)$$

$$-f_{h_j}^{\max} \leq f_{h_j} \leq f_{h_j}^{\max} \quad (8)$$

$$\theta_{\text{ref}}^{\max} = 0 \quad (9)$$

式中： P_i^{\max} 和 P_i^{\min} 分别为机组 i 的最大出力和最小出力； f_{h_j} 、 $f_{h_j}^{\max}$ 分别为线路 h_j 的传输功率及其最大值； D_j 为节点 j 的负荷； $C_{G,j}$ 为节点 j 上的机组集合； $C_{F,j}$ 为以节点 j 为起点的传输线路集合； $C_{E,j}$ 为以节点 j 为终点的传输线路集合； θ_h 和 θ_j 分别为节点 h 和节点 j 的相角； x_{h_j} 为线路 h_j 的阻抗； $\theta_{\text{ref}}^{\max}$ 为平衡节点的相角。

1.2.2 燃气网络约束条件

电力系统和燃气系统通过气-电设备(燃气机组)和电-气设备(PtG)耦合。本文中的耦合设备是燃气机组，其燃气消耗量可定义为

$$F_i^{\text{GAS}} = \beta_{1,i} + \beta_{2,i}P_{i,t} + \beta_{3,i}(P_{i,t})^2 \quad (10)$$

式中： F_i^{GAS} 为燃气机组 i 的燃气需求量； $\beta_{1,i}, \beta_{2,i}, \beta_{3,i}$ 为多项式系数； $P_{i,t}$ 为燃气机组 i 在 t 时刻的出力。

燃气平衡约束条件如式(11)、(12)所示：

$$\sum_{n \in C_{p,m}} g_{mn} - \sum_{w \in C_{s,m}} v_w + L_m = 0 \quad (11)$$

$$L_m = \sum_{i \in C_{U,m}} F_i^{\text{GAS}} + Q_m \quad (12)$$

式中： g_{mn} 为从燃气节点 m 到燃气节点 n 的天然气流量； L_m 是节点 m 的燃气负荷； Q_m 为其他燃

气负荷需求; $C_{p,m}$, $C_{s,m}$, $C_{u,m}$ 分别代表与节点 m 相连的燃气管道、气井和燃气机组集合。

在树型天然气系统中, 起始节点的压力始终高于终止节点。设 m 为起始节点, n 为终止节点, 则方程(13)、(14)是对天然气管道流量的约束, (15)、(16)为气体压力约束。

$$g_{mn} = C_{mn} \sqrt{\pi_m^2 - \pi_n^2} \quad (13)$$

$$g_{mn} + g_{nm} = 0 \quad (14)$$

$$\pi_m^{\min} \leq \pi_m \leq \pi_m^{\max} \quad (15)$$

$$\pi_m \geq \pi_n \quad (16)$$

式中: π_m 和 π_n 分别为燃气节点 m , n 的气压; C_{mn} 为与天然气管道 mn 长度和其他特性有关的参数; π_m^{\min} 和 π_m^{\max} 分别为燃气节点 m 的最小、最大压力。

1.2.3 热力系统约束条件

本文中热力需求由热点联产(combined heat and power, CHP)机组给出, CHP 机组的电、热关系如式(17)所示:

$$P_i = k_i H_i \quad (17)$$

式中: H_i 为机组 i 产生的热能; k_i 为电能热能转化比。

在热负荷节点, 热能产量为

$$H = C_p (\sum m_{in} T_{in} - \sum m_{out} T_{out}) \quad (18)$$

式中: m_{in} 、 m_{out} 分别为流入、流出速率; T_{in} 、 T_{out} 分别为流入、流出温度; C_p 为转换系数。

给定管道的始端温度 T_{st} 和环境温度 T_a , 那么管道末端温度 T_{ed} 计算公式为

$$T_{ed} = (T_{st} - T_a) e^{\frac{-\lambda L}{C_p s}} + T_a \quad (19)$$

式中: λ 、 L 分别为管道热系数与管道长度; s 为流量。

对于每个节点, 气体流入、流出必须保持平衡, 即

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (20)$$

2 改进 NSGA-II 算法

2.1 NSGA-II 的优势

在本文提出的综合能源系统最优调度模型

中, 等式约束(13)是非凸的, 因此不能直接使用 CPLEX 或 Gurobi 等求解器进行计算, 而遗传算法能够有效地处理此类问题。传统的多目标遗传算法存在单位时间内搜索到帕累托最优解数量较少、难以处理多个等式约束的问题。

在 NSGA-II 算法被提出之前, NSGA 是一种非常流行的多目标遗传算法, 但它有以下缺点: 1) 计算复杂性高; 2) 未采用精英机制; 3) 需要指定共享参数 π_1 。

NSGA-II 采用快速非支配排序方法、密度估计和拥挤比较算子来解决上述问题。相对于 NSGA 方法, NSGA-II 的主要改进如下:

- 1) 提出了快速非支配排序方法。与 NSGA 的非支配排序相比, 其计算复杂度大幅降低。
- 2) 提出了密度估计和拥挤比较算子代替共享参数运算, 降低了计算的复杂度。

2.2 全局帕累托最优解集维护

传统 NSGA-II 算法的帕累托最优解仅源于当代, 难以获得更多的帕累托最优解, 并且难以将种群大小控制在合适的范围内。

改进的 NSGA-II 算法维持全局帕累托最优解集, 在计算出每一代帕累托非支配解后, 执行以下操作:

- 1) 将这些非支配解与全局帕累托最优解集进行比较。
- 2) 更新全局帕累托最优解集。将当前遗传代数下的局部非支配个体中不受全局帕累托最优解集支配的个体添加到全局帕累托最优解集中。
- 3) 通过降低适应性来惩罚由全局帕累托最优解集所支配的局部非支配个体。

2.3 等式约束特殊处理

2.3.1 非线性等式约束处理

在电-气-热综合系统优化调度问题中, 只有一个非线性等式约束(13)。因此, 首先将所有的 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{N_{gas}}$ 设置为优化变量, 所有的 g_{mn} 可以由非线性方程确定。

2.3.2 动态调整线性等式约束

即使选择了一组好的优化变量, 仍然有可能不满足某些等式约束。动态调整可以纠正一组不

满足等式约束但只有少量违规的变量。

假设有一个线性等式约束 $f_{ec}(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n) = 0$ ，其中 x_1 到 x_{k+1} 是优化变量， x_{k+1} 到 x_n 是附加变量，即可以通过优化变量和其他等式约束来计算。为简便，记 $f_{ec}(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n) = 0$ 为 $f_{ec}(x) = 0$ 。

设动态调整阈值为 T_{min} 和 T_{max} ($T_{min} < T_{max}$ ， T_{min} 应为一个较小的值)，最大动态调整次数 N_{max} 。对于某组变量 x^0 ，记 $f_{ec}(x^0) = \Delta y^0$ 。如果 $\Delta y^0 \leq T_{min}$ ，则认为满足近似。如果 $T_{min} < \Delta y^0 < T_{max}$ ，则开始动态调整。初始状态为

$$f_{ec}(x^0) = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = \Delta y^0 \quad (21)$$

若已进行了 t 次动态调整，当进行第 $t+1$ 次动态调整时，优化变量根据 $\Delta y^t = f_{ec}(x^t)$ 进行更新。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \Delta y^t / k, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (22)$$

如式(22)所示，首先计算 $x_0^{t+1}, x_1^{t+1}, \dots, x_k^{t+1}$ ，然后根据 $\Delta y^{t+1} = f_{ec}(x^{t+1})$ 可以计算 $t+1$ 次的违规量。如果 $\Delta y^{t+1} < T_2$ ，则满足松弛等式约束，退出动态调整并取 x^{t+1} 作为优化变量值。如果当 $t = N_{max} - 1$ 时仍然没有满足松弛等式约束的优化变量，则停止动态调整并将记约束不满足。

2.3.3 惩罚函数

为了确保优化变量满足约束条件，可以在目标函数 f_i 的基础上添加惩罚项，对种群个数进行惩罚。定义不等式约束惩罚因子 C_{ic} ，2 个级别的等式约束惩罚因子 C_{ec1} 和 C_{ec2} ($C_{ec1} < C_{ec2}$)。设动态调整后的变量集合为 x_d ，所有等式约束的集合为 F_{ec} ，所有不等式约束的集合为 F_{ic} 。

对于不等式约束 $f_{ic}(x) \in [y_{min}, y_{max}]$ 。如果 $f_{ic}(x_d) = y$ ，相应的惩罚是

$$P_{ic}[f_{ic}(x_d)] = \begin{cases} C_{ic} \frac{y - y_{max}}{y_{max} - y_{min}}, & y > y_{max} \\ 0, & y_{min} \leq y \leq y_{max} \\ C_{ic} \frac{y_{min} - y}{y_{max} - y_{min}}, & y < y_{min} \end{cases} \quad (23)$$

对于等式约束 $f_{ec}(x) = 0$ ，如果 $|f_{ec}(x_d)| = y$ ，相应的惩罚是

$$P_{ec}[f_{ec}(x_d)] = \begin{cases} 0, & y = 0 \\ C_{ec1}, & 0 < y < T_{min} \\ C_{ec2}, & y \geq T_{min} \end{cases} \quad (24)$$

总惩罚为

$$P(x_d) = \sum_{f_{ic} \in F_{ic}} P_{ic}[f_{ic}(x_d)] + \sum_{f_{ec} \in F_{ec}} P_{ec}[f_{ec}(x_d)] \quad (25)$$

2.4 改进 NSGA-II 求解流程

定义 f_{pi} 来计算考虑目标函数和约束条件下变量 x_d 的综合适应度：

$$f_{pi}(x) = w_1 \times O(x) + w_2 \times P(x) \quad (26)$$

式中： w_1 与 w_2 为权重参数，根据对于目标函数和约束条件的重视程度分配； $O(x)$ 为目标函数，由于取最小化优化，因此系数项带有负号； $P(x)$ 为总惩罚函数。

确定适应度函数后，可基于适应度函数不断调整寻优过程，完成改进 NSGA-II 的完整求解流程，如图 1 所示。

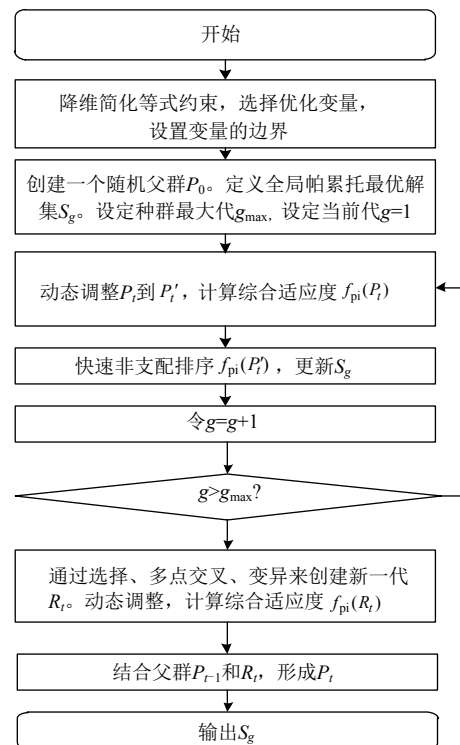


图 1 改进 NSGA-II 求解流程
Fig. 1 Solution process of improved NSGA-II

3 算例分析

3.1 电-气-热综合系统拓扑结构

由于目前尚未有电、气、热联合系统的标准

算例，为检验所提出方法的有效性，在 6 电气-6 燃气节点系统^[4]的基础上，增加了一个包含 4 个热交换器的热力网络，形成电-热-气综合系统模型。该系统模型包含典型电、气、热联供系统中的所有关键元件及典型连接，系统的拓扑结构如图 2 所示。

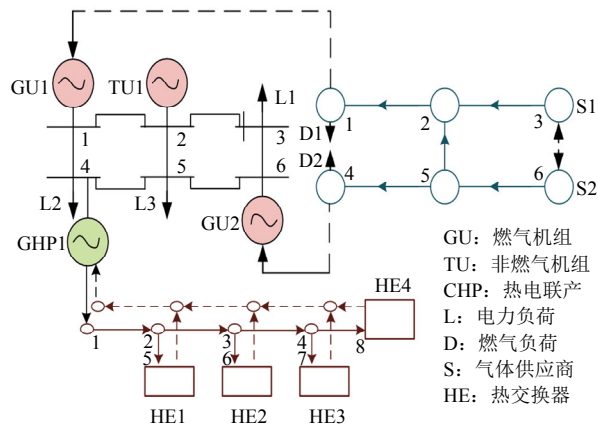


图 2 电-热-气综合系统拓扑结构

Fig. 2 Topology of electricity-gas-heat system

3.2 帕累托最优解集搜索过程

NSGA-II 的帕累托最优解集由当前一代的个体产生，可以称为局部帕累托最优解集。本文提出的改进 NSGA-II 算法维持了一个全局帕累托最优解集，以获得更多的帕累托最优解。应当指出，为了防止解的分布过于集中，每次更新局部帕累托最优解集或全局帕累托最优解集之前，应当采用基于拥挤距离的过滤。

局部帕累托最优解集和第 20 代与第 100 代的全局帕累托最优解集分别如图 3、4 所示。

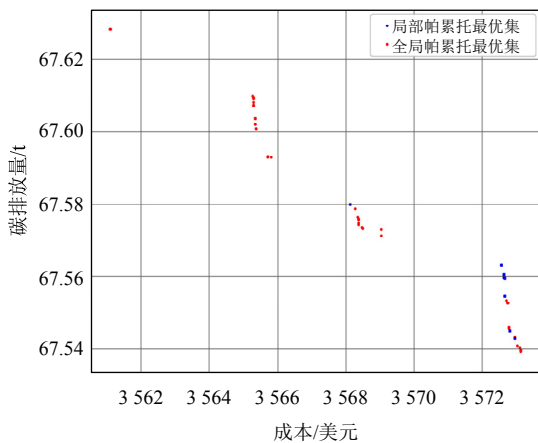


图 3 第 20 代帕累托最优解集

Fig. 3 Pareto set of generation 20

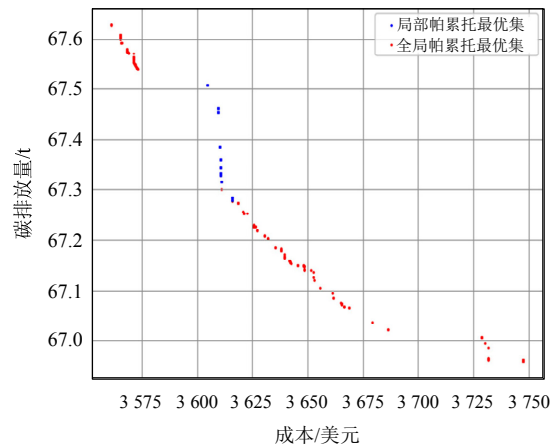


图 4 第 100 代帕累托最优解集

Fig. 4 Pareto set of generation 100

3.3 求解效率

不同代的非重复局部帕累托最优解和全局帕累托最优解的数量如图 5 所示。

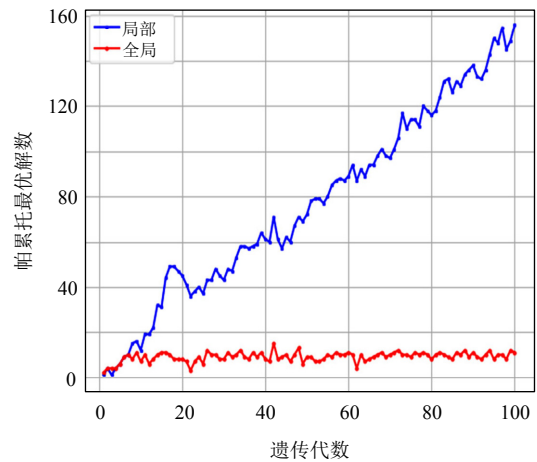


图 5 帕累托最优解的数量

Fig. 5 The number of Parato-optimal solutions

随着遗传代数增加，局部帕累托最优解的数量保持稳定，全局帕累托最优解的数量呈线性增长趋势。在第 100 代，全局帕累托最优解的数量是局部帕累托最优解的 14.18 倍。

本文在配置 Intel(R)Core(TM)i7-5500U CPU @2.40GHz 2.39GHz 和 4GB RAM 的台式计算机上进行计算，所需时间如图 6 所示。

4 结论

提出了一种基于改进 NSGA-II 算法的电-气-热综合能源系统多目标优化调度的方法，可用于求解含非凸约束的优化调度模型。通过动态调整

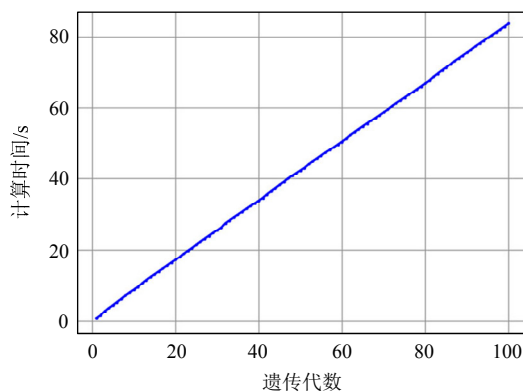


图6 计算时间成本

Fig. 6 Computational time cost

和添加惩罚函数的方法，解决了大量等式约束下的模型求解难题。通过设置和维护全局帕累托最优解集，显著增加了单位时间帕累托最优解数量。算例验证了所提出方法的有效性。

所提出模型尚未考虑到天然气和热力网络的动态特性，对建模精度可能产生一定影响。在后续的研究中将会计及网络动态特性，建立更加精确的优化模型。

参考文献

- [1] 常晓勇, 王玉婷, 陈福锋, 等. 电力-天然气综合能源系统建模与仿真[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 13-18.
- [2] 林晓明, 张勇军, 肖勇, 等. 计及设备启停的含电转气园区能源互联网两阶段优化调度模型[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 62-70.
- [3] 宋阳, 张新鹤, 王磊. 捆绑合作模式下计及综合能源服务商新型项目的低碳调度[J]. 电力建设, 2019, 40(3): 9-16.
- [4] He Y, Shahidepour M, Li Z, et al. Robust constrained operation of integrated electricity-natural gas system considering distributed natural gas storage [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(7): 1061-1071.
- [5] Zhang X, Shahidepour M, Alabdulwahab A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 592-601.
- [6] Zlotnik A, Roald L, Backhaus S, et al. Coordinated scheduling for interdependent electric power and natural gas infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 600-610.
- [7] 何力, 吕红芳. 考虑经济性的多微电网优化调度研究[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 397-404.
- [8] Askarzadeh A. A memory-based genetic algorithm for optimization of power generation in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9: 1081-1089.
- [9] 王玺, 杨秀媛, 范新桥, 等. 潮流分析和鸟群优化在风水协同运行中的应用[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 171-176.
- [10] 熊虎岗, 程浩忠, 李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 36(11): 102-108.
- [11] 宋春丽, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进和声搜索算法的电网多目标差异化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 142-148.
- [12] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [13] Han T, Chen Y, Ma J, et al. Surrogate modeling-based multi-objective dynamic VAR planning considering short-term voltage stability and transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 622-633.
- [14] Deng Z, Liu M, Ouyang Y, et al. Multi-objective mixed-integer dynamic optimization method applied to optimal allocation of dynamic var sources of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1683-1697.

收稿日期: 2019-04-14。

作者简介:



蒋猛

蒋猛(1989), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力调度, 272522195@qq.com;



郭创新

郭创新(1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能调度及风险调度、智能信息处理技术及其在电力系统的应用, guochuangxin@zju.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)