

DOI: 10.7667/PSPC180351

计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度

彭春华, 刘兵, 左丽霞, 孙惠娟

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 孤岛微网优化调度中的源荷协调性非常重要, 却常被忽视。针对孤岛微网的运行特点, 计及分类负荷需求响应, 构建了以系统运行成本及污染排放最小化为目标的微网源荷协调多目标优化调度模型。并引入多核并行运算环境和多种群并行交叉变异机制, 构建新型的并行多目标微分进化(PMODE)算法对模型进行高效求解, 以调和常规智能算法寻优深度和速度间的矛盾。结合应用结果分析了分类负荷发生转移及削减前后对微网内各分布式电源的出力影响和负荷的峰谷调整状况。表明所提出的孤岛微网源荷协调优化调度模型可有效实现节能减排和提升风光消纳率, 并验证了 PMODE 算法的优越性能。

关键词: 孤岛微网; 需求响应; 分类负荷; 源荷协调; 并行优化

Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response

PENG Chunhua, LIU Bing, ZUO Lixia, SUN Huijuan

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

Abstract: As the source-load coordination in the dispatch optimization of island micro-grid is very important but often neglected, based on the operation characteristics of island micro-grid and load classified demand response, a multi-objective optimal dispatch model considering source-load coordination of micro-grid with goals of minimizing operation cost and pollution emission is established. By introducing multi-core parallel computing environment and multi-population parallel crossover mutation mechanism, a new Parallel Multi-objective Differential Evolution (PMODE) algorithm is designed to solve the model effectively, in order to harmonize the contradiction between optimization depth and speed of conventional intelligent algorithm. Based on the application results, the influence of classified load transfer and pre-and after cutting on the output of each distributed power in microgrid and the load adjustment of peak-valley are analyzed. The results show that the proposed optimal dispatch model can effectively realize energy saving and emission reduction and improve the utilization rate of wind/photovoltaic power, verifying the superior performance of PMODE.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567007 and No. 51867008) and Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20171BAB206042) and Jiangxi Innovate Foundation of Graduate (No. YC2017-S251).

Key words: island micro-grid; demand response; classified load; source-load coordination; parallel optimization

0 引言

孤岛微网凭借独立组网、高度自治的特点, 成为解决高原、海岛等偏远地区分散电力需求的一种有效途径^[1-2], 同时, 其内部含有大量风电、光伏等

可再生清洁能源, 能够有效缓解传统依赖化石能源发电方式带来的经济和环境问题。然而, 不同于并网型微网和传统大电网, 孤岛微网具有电源分布不均、发电间歇性以及受负荷影响大等特点, 并且其内部源荷协调性又常被忽视, 这使得孤岛微网的环境、经济调度难度大大增加, 而合理的资源调度方式将有助于提高微网的运行经济性和环境友好性。因此, 研究孤岛微网内资源优化问题意义重大。

传统模式下的微网多从供应侧角度, 研究能源

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51567007, 51867008); 江西省自然科学基金项目资助 (20171BAB206042); 江西省研究生创新资金项目资助 (YC2017-S251)

的优化分配问题, 没有充分挖掘需求侧各类资源的潜力, 随着需求侧管理技术的不断改进, 用户的需求侧响应行为已经使负荷成为一种相对可控的资源^[3-5]。考虑用户用电的需求侧和系统发电的供应侧协调联动可以改善系统运行经济性, 文献[6]通过建立电力系统“源-荷-储”三维架构, 采用两级优化方法分析可再生能源、负荷和储能在系统运行优化中的协调关系, 文献[7]建立了计及可中断负荷响应的日前发电侧与需求侧协同调度优化模型, 文献[8]构建了兼容需求侧资源的电力系统“源-网-荷-储”优化模型, 通过提高需求侧和供应侧资源的协调可控来处理当前电力系统双侧随机问题。文献[9-10]引入需求侧管理(Demand Side Management, DSM)的概念, 文献[9]提出一种包含储能和可控负荷资源的需求侧管理优化方法, 文献[10]针对如何从能量管理的角度来提高微网运行经济性, 建立了基于微网的需求侧能量管理优化模型。以上文献大多基于电源容量充足、对负荷稳定供电的前提下考虑需求侧和供应侧的联动行为, 但孤岛型微网由于自身电源容量的限制和可再生能源出力的不确定性, 在调度时段不可避免地会出现重要负荷需优先供电, 部分负荷将转移供电或不得不中断供电的问题, 因此为制定合理可靠的需求侧响应模型, 必须对负荷进行分类处理。文献[11]将孤岛微网内的用电设备分为可延迟负荷和非可延迟负荷, 文献[12]定义一类具有中断能力或平移能力的电力负荷为柔性负荷, 研究了柔性负荷响应微网自治调度策略, 文献[13]提出负荷聚合商基于负荷削减与负荷转移两种需求响应合同的投标决策优化模型, 从而使聚合商能够有效调度用户的可控负荷。为了充分挖掘需求侧资源, 本文将负荷分为优先供电的重要负荷、根据分时电价调整用电时段的可转移负荷以及可及时削减的可控制负荷, 并建立分类负荷需求响应模型; 结合系统储能充放电模型, 构建了以系统运行成本及污染排放最小化为目标的微网源荷协调优化调度模型。

为求解上述目标耦合、多约束、非线性的复杂优化模型, 本文将高性能的多目标微分进化^[14]与多核并行运算环境相结合, 提出并行多目标微分进化算法(Parallel Multi-objective Differential Evolution, PMODE)。相比常规串行优化算法, 在并行运算环境中, 由于不同核种群的初始状态不同以及可采用不同的进化算法和策略, 即使每个核种群内部个体会随着进化发展而趋于相似, 但不同核种群间个体仍会长期存在一定差异, 并且还可通过核种群间移民操作进一步改善个体多样性, 有效克服算法后期

变异失效而导致进化停滞的问题, 从而获得优越的深度寻优性能, 可实现对本文模型的高效求解。

1 微网分类负荷需求响应模型

本文将孤岛微网内的用电负荷分为三类: 重要负荷、可转移负荷和可控制负荷, 并根据用电类型对各类负荷作了新的界定。重要负荷为一些基础性用电设备, 如照明用电、通信用电等, 在调度时段内优先满足其供电; 可转移负荷为一些用电时段具有一定灵活性的用电设备, 如洗衣机、可定时电饭煲等, 在调度时段内采用价格型需求响应引导负荷峰谷转移; 可控制负荷为一些允许短时停电且具有热/冷储存能力的负荷, 如空调、热水器等, 在调度时段内采用激励型需求响应直接控制方式进行负荷削减, 并给予削减补偿。

1.1 价格型需求响应

价格型需求响应通过制定分时电价引导用户转移用电负荷分布, 分时电价参照峰谷电价的制定方法^[15], 在平均电价 Q_f 上进行适当调整得出峰时段电价 Q_p 和谷时段电价 Q_v 。

$$\begin{cases} Q_p = Q_f(1 + \varphi_p) \\ Q_v = Q_f(1 - \varphi_v) \end{cases} \quad (1)$$

式中, φ_p 和 φ_v 分别为分时电价上、下调比例。

基于负荷需求弹性理论, 建立用电量对电价变化量的响应模型, 用电量和电价的关系表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 / P_1 \\ \Delta P_2 / P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{24} / P_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1} & \cdots & \varepsilon_{1,24} \\ \varepsilon_{2,1} & \cdots & \varepsilon_{2,24} \\ \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{24,1} & \cdots & \varepsilon_{24,24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 / Q_1 \\ \Delta Q_2 / Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{24} / Q_{24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta P(i)}{P_0(i)} \frac{Q_0(i)}{\Delta Q(i)}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{\Delta P(i)}{P_0(i)} \frac{Q_0(j)}{\Delta Q(j)} \quad (3)$$

式中: ε_{ii} 为自弹性系数, ε_{ij} 为交叉弹性系数; $P_0(i)$ 与 $\Delta P(i)$ 分别为时段 i 的初始电量和电量改变量; $Q_0(i)$ 和 $Q_0(j)$ 分别为 i 时刻和 j 时刻的初始电价; $\Delta Q(i)$ 和 $\Delta Q(j)$ 分别为 i 时刻和 j 时刻电价与初始电价的价格差。

则用电量对价格变化量的响应模型表示为

$$P(i) = P_0(i) \left[1 + \varepsilon_{ii} \frac{\Delta Q(i)}{Q_0(i)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} \varepsilon_{ij} \frac{\Delta Q(j)}{Q_0(j)} \right] \quad (4)$$

式中, $P(i)$ 为 i 时刻的总用电量。

1.2 激励型需求响应

激励型需求响应通过直接负荷控制(Direct Load

Control, DLC)实现负荷削减。系统在日前会公布用电高峰期的供电缺额,用户则会按阶梯分级报价的形式向微网提交每小时的负荷削减量,微网将按照用户的负荷削减量及阶梯报价,按成本从低到高选择DLC对象及实际负荷削减量。基于阶梯分级报价的DLC补偿成本计算式为

$$F_{\text{load,cut}}^m(t) = \begin{cases} q_1^m d_t^m, & 0 < d_t^m \leq D_1^m \\ \sum_{l=1}^n q_l^m D_l^m + q_{l+1}^m (d_t^m - \sum_{l=1}^n D_l^m), & \sum_{l=1}^n D_l^m < d_t^m \leq \sum_{l=1}^{n+1} D_l^m \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_{\text{load,cut}}^m(t)$ 为微网对用户 m 在 t 时刻削减负荷的补偿成本; d_t^m 为用户 m 在 t 时刻的实际负荷削减量; D_l^m 为设定的用户 m 的第 l 级削减负荷区段间隔; q_l^m 为其第 l 级削减负荷相对应的阶梯报价; n 为可变正整数。

2 微网源荷协调调度模型

2.1 优化目标

目标 1: 微网运行成本最低

柴油发电机(Diesel Generator, DG)的发电成本包括燃料成本、投资折算到一天的成本以及运行维护成本。储能单元(Energy Storage System, ESS)考虑其投资折算到一天的成本以及运行维护成本。本文不考虑风电(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)的发电成本。微网运行成本最低目标可表达为

$$F_1 = \min(F_{\text{load,DR}} + F_{\text{DG}} + F_{\text{ESS}}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_{\text{load,DR}} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M F_{\text{load,cut}}^m(t) \\ F_{\text{DG}} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K ((\alpha_k P_{\text{DG},k}^2(t) + \beta_k P_{\text{DG},k}(t) + \gamma_k) + \frac{f_{\text{DG},k}}{P_{\text{DG},k}^{\text{max}} \times T_{\text{DG},k} \times C_{\text{DG},k}} P_{\text{DG},k}(t) + OM_{\text{DG},k} \times P_{\text{DG},k}(t)) \\ F_{\text{ESS}} = \sum_{t=1}^T \frac{f_{\text{ESS}}}{T_{\text{ESS}} \times C_{\text{ESS}}} |P_{\text{ESS}}(t)| + OM_{\text{ESS}} \times |P_{\text{ESS}}(t)| \\ f_{\text{DG},k} = C_{\text{az,DG},k} \times CRF_1 \\ f_{\text{ESS}} = C_{\text{az,ESS}} \times CRF_2 \\ CRF_1 = \frac{z(1+z)^L}{(1+z)^L - 1} \\ CRF_2 = \frac{z(1+z)^{cl}}{(1+z)^{cl} - 1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F_{\text{load,DR}}$ 、 F_{DG} 、 F_{ESS} 分别为分类负荷的需求响应成本、柴油发电机成本和储能单元成本; α_k 、 β_k 和 γ_k 为第 k 台 DG 的能耗系数; $P_{\text{DG},k}(t)$ 和

$P_{\text{ESS}}(t)$ 分别为第 k 台 DG 在 t 时刻的实际输出功率和储能单元在 t 时刻的充放电功率; $P_{\text{DG},k}^{\text{max}}$ 为第 k 台 DG 的最大输出功率; $T_{\text{DG},k}$ 和 T_{ESS} 分别为第 k 台 DG 和 ESS 的年运行小时数; $C_{\text{DG},k}$ 和 C_{ESS} 分别为影响第 k 台 DG 和 ESS 的容量因素; $OM_{\text{DG},k}$ 和 OM_{ESS} 分别为第 k 台 DG 和 ESS 的运行管理成本系数; $f_{\text{DG},k}$ 和 f_{ESS} 分别为第 k 台 DG 和 ESS 的年均折旧成本; $C_{\text{az,DG},k}$ 和 $C_{\text{az,ESS}}$ 分别为第 k 台 DG 和 ESS 的单位容量安装成本; CRF_1 和 CRF_2 分别为 DG 和 ESS 的资本回收系数; z 为利率; L 为柴油机的使用寿命; cl 为蓄电池循环寿命。

相关研究表明,放电深度(Depth of Discharge, DOD)决定蓄电池的循环寿命, t 时刻的 DOD 可表示为

$$DOD(t) = 1 - SOC(t) \quad (8)$$

ESS 在 t 时刻的荷电状态(State of Charge, SOC)与本时刻的充放电量和 $t-1$ 时刻的 SOC 值有关,其充放电过程可描述为

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{\eta_c P_{\text{ESS}}^c(t)}{C_{\text{bat,ESS}}} - \frac{P_{\text{ESS}}^d(t)}{\eta_d C_{\text{bat,ESS}}} \quad (9)$$

电池循环寿命为

$$cl = \rho_0 \left(\frac{DOD_R}{DOD(t)} \right)^{\rho_1} \exp[\rho_2 (1 - \frac{DOD(t)}{DOD_R})] \quad (10)$$

式中: ρ_0 、 ρ_1 和 ρ_2 为基于 DOD 的蓄电池循环寿命系数; DOD_R 为 DOD 的额定值; $P_{\text{ESS}}^c(t)$ 和 $P_{\text{ESS}}^d(t)$ 分别为储能充电和放电功率; η_c 和 $1/\eta_d$ 分别是储能充电和放电效率; $C_{\text{bat,ESS}}$ 为储能容量。

目标 2: 污染气体排放最低

孤岛微网中污染气体排放主要来源于柴油发电机等可控型微源,风电、光伏等可再生能源无污染排放,则污染气体排放最低目标可表达为

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K P_{\text{DG},k}(t) \sum_{s=1}^S V_{k,s} \quad (11)$$

式中: S 为污染气体种类数; $V_{k,s}$ 为可控单元 k 的污染气体 s 排放量。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{m=1}^M P_{\text{load,DR}}(t) + P_{\text{ESS}}^c(t) = \sum_{k=1}^K P_{\text{DG},k}(t) + \quad (12)$$

$$P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{ESS}}^d(t)$$

式中: $P_{\text{load,DR}}(t)$ 为 t 时段微网内用户经过需求响应

调整后的负荷需求; 任意时段内储能充放电满足

$$P_{ESS}^c(t)P_{ESS}^d(t) = 0.$$

2) 柴油发电机容量约束

柴油发电机需满足机组容量限制才能稳定运行, 即要求

$$P_{DG,k}^{\min} \leq P_{DG,k}(t) \leq P_{DG,k}^{\max}, \quad k=1,2,\dots,n \quad (13)$$

式中, $P_{DG,k}^{\max}$ 、 $P_{DG,k}^{\min}$ 分别为第 k 台柴油发电机最大、最小输出功率。

3) 柴油发电机爬坡约束

$$\begin{cases} P_{DG,k}(t) - P_{DG,k}(t-1) - R_k^{\text{up}} \times \Delta T \leq 0 \\ P_{DG,k}(t-1) - P_{DG,k}(t) - R_k^{\text{down}} \times \Delta T \leq 0 \end{cases}, \quad k=1,2,\dots,n \quad (14)$$

式中, R_k^{up} 、 R_k^{down} 分别为 DG 的上升和下降爬坡速率。

4) 蓄电池电量充放电约束

$$0 \leq P_{ESS}^c(t) \leq P_{ESS}^{\text{max}}(t) \quad (15)$$

$$0 \leq P_{ESS}^d(t) \leq P_{ESS}^{\text{dmax}}(t) \quad (16)$$

$$P_{ESS}^{\text{max}}(t) = (SOC_{\text{max}} - SOC(t-1)) \times Cbat_{ESS} / \eta_c \quad (17)$$

$$P_{ESS}^{\text{dmax}}(t) = (SOC(t-1) - SOC_{\text{min}}) \times Cbat_{ESS} \times \eta_d \quad (18)$$

$$SOC_{\text{min}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{max}} \quad (19)$$

$$SOC(0) = SOC(T) \quad (20)$$

式中: P_{ESS}^{max} 和 P_{ESS}^{dmax} 分别为储能最大充放电功率; SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别为储能的极大最小荷电状态。

5) 旋转备用约束

a. 正旋转备用约束

$$\begin{aligned} & P_{\text{wind}}(t) \times \omega_{\text{u,wind}} + P_{\text{pv}}(t) \times \omega_{\text{u,pv}} + P_{\text{load}}(t) \times \omega_{\text{u,load}} - \\ & \min((SOC(t) - SOC_{\text{min}}) \times Cbat_{ESS} / \eta_d, P_{ESS}^{\text{dmax}}(t)) - \\ & \sum_{i=1}^n UR_k(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$UR_k(t) = \min(P_{DG,k}^{\text{max}} - P_{DG,k}(t), R_k^{\text{up}} T_{10}) \quad (22)$$

b. 负旋转备用约束

$$\begin{aligned} & (P_{\text{wind,max}} - P_{\text{wind}}(t)) \times \omega_{\text{d,wind}} + (P_{\text{pv,max}} - P_{\text{pv}}(t)) \times \omega_{\text{d,pv}} + \\ & P_{\text{load}}(t) \times \omega_{\text{d,load}} - \min((SOC_{\text{max}} - SOC(t)) \times Cbat_{ESS} \times \\ & \eta_c, P_{ESS}^{\text{cmax}}(t)) - \sum_{i=1}^n DR_k(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$DR_k(t) = \min(P_{DG,k}(t) - P_{DG,k}^{\text{min}}(t), R_k^{\text{down}} T_{10}) \quad (24)$$

式中: $\omega_{\text{u,wind}}$ 、 $\omega_{\text{u,pv}}$ 、 $\omega_{\text{u,load}}$ 分别为风电、光伏、负荷预测误差在时段 t 对正旋转备用的需求系数; $\omega_{\text{d,wind}}$ 、 $\omega_{\text{d,pv}}$ 、 $\omega_{\text{d,load}}$ 分别为风电、光伏、负荷预测误差在时段 t 对负旋转备用的需求系数; $UR_k(t)$ 和 $DR_k(t)$ 分别为第 k 台 DG 在 t 时刻的正旋转备用容

量和负旋转备用容量; T_{10} 为响应时间, 取 10 min。

6) 负荷削减量约束

$$0 \leq d^m \leq D_{\text{max}}^m \quad (25)$$

式中, D_{max}^m 是对用户 m 的最大负荷削减量。

3 PMODE 算法

现代智能进化算法相比经典优化算法, 在全局寻优能力、多目标优化和适应性方面体现出明显优势, 近年来已成为电力系统优化决策中常用的方法^[16-18]。然而, 智能进化算法在解决复杂问题时, 普遍存在寻优深度与寻优速度的矛盾以及种群内各个体在进化后期相似度越来越高而导致进化趋于停滞的现象。对于具有高度复杂性而需要深度寻优的微网源荷协调多目标优化调度来说, 上述问题将会导致寻优不彻底而陷入早熟。为此, 本文设计了基于多核并行协同进化的 PMODE 算法来解决。

3.1 算法流程和步骤

PMODE 算法将单种群串行进化扩展到多核种群并行进化, 在进化过程中采用多核种群并行交叉变异机制, 算法流程如图 1 所示, 主要步骤如下:

1) 将规模为 $npop$ 的种群按核数均分为 n 个规模为 $cpop$ 的子种群, 并分配给每个计算单元 lab 寻优。

2) 各 lab 并行计算各自初始种群的适应度值, 根据多目标微分进化算法步骤生成新种群。

3) 根据下节中式(27)计算第 g 代的通信间隔 gap , 并判断是否通信。若通信则启动 Matlab 并行工具箱中的路障函数将各子程序同步到第 g 代, 执行步骤 4); 若不通, 则直接执行步骤 5)。

4) 当第 g 代通信时, 根据式(27)计算此时动态通信池规模 $pool$ (锦标赛优选操作所得优秀个体 $x_{e,n}$ 数目), 然后通过首尾循环通信方式进行各计算单元间的数据传递; 如图 1 红色虚线箭头方向所示。

此外, 为避免因通信造成子种群间个体重复, 使寻优因多样性差而停滞, 本文借鉴 DE/best/1 变异机制^[14]提出式(26)的交叉方法, 根据本通信池内随机优秀个体 $x_{e,1}^i$ 、 $x_{e,1}^j$ 与通信接收个体 $x_{e,n}$ 交叉获得新个体 $x_{\text{new},1}$, 使 $x_{\text{new},1}$ 能够继承 $x_{e,n}$ 的良好“基因”, 但又与其存在差异。而后将 $x_{\text{new},1}$ 并入中间子种群 $cpop_2$, 其规模为 $1.5cpop + pool$ 。

$$lab: x_{\text{new},1} = x_{e,n} + rand(x_{e,1}^i - x_{e,1}^j), i \neq j \quad (26)$$

5) 当种群迭代次数未达到通信间隔的倍数时, 继续种群迭代 $g=g+1$, 然后判断是否满足终止条件, 若不满足执行步骤 3, 若满足条件则合并种群, 输出 Pareto 最优解集。最后, 再借鉴文献[19]中构造评价两个目标函数的模糊隶属度函数, 基于与虚拟

理想距离最短原则的方法从 Pareto 最优解集中提取出最优折衷解。

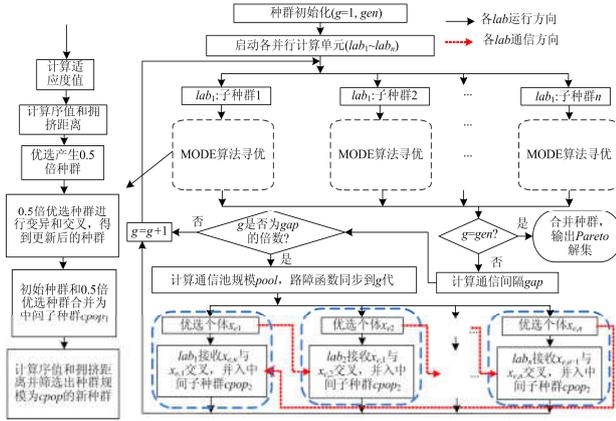


图 1 并行多目标微进化算法流程
Fig. 1 Process of PMODE

3.2 并行通信

并行程序在优化过程中，寻优效果的好坏主要取决于子程序间的数据通信力度(由通信间隔 gap 、个体通信规模 $pool$ 两方面描述。通信间隔越小，通信越频繁；个体通信规模越大，变异交叉的个体数目越多)。数据通信力度较大时，子种群寻优效率高，但子程序通信前须执行路障函数保持各子程序迭代次数同步以及通信造成的延迟将严重影响算法的寻优速度^[20]；而当数据通信力度较小时，子程序执行速度快，但小种群寻优效果参差不齐，易陷入局部最优解。因此在保证并行程序寻优精度的前提下，如何平衡通信力度，提高数据的通信质量具有重要意义。根据群智能算法寻优特点，优化前期，种群多样性高，要保障足够的搜索广度，此时的通信力度要小；而优化后期，应提高精度寻优效率，及时分享优秀个体，此时通信力度反而要大。为此，本文依据式(27)对 gap 和 $pool$ 进行动态调整。

$$\begin{cases} gap = \text{round}(gen / g \times gen / 100) \\ pool = \text{round}(cpop / (10 \times gen / g)) \end{cases} \quad (27)$$

式中： gen 为总优化代数； $cpop$ 为子种群规模； $\text{round}()$ 为取整函数，若 gap 大于 gen 时，判定为不通信。

3.3 PMODE 算法并行效率

衡量 PMODE 算法并行效率的 2 个重要指标加速比 Cel 和线程效率 Eff 的数学表达式为

$$Cel_{pn} = \frac{T_1}{T_{pn}} \quad (28)$$

$$Eff_{pn} = \frac{Cel_{pn}}{pn} \quad (29)$$

式中： T_1 为算法串行计算运行时间； T_{pn} 为算法在

pn 个线程环境下的运行时间。

4 算例分析

以某孤岛微网为例，该微网内 2 台 DG，7 台 50 kW 风电机组，10 台 25 kW 光伏机组，柴油发电机及风电、光伏出力限值见表 1，柴油发电机和蓄电池运维参数见表 2，各出力单元污染气体排放系数见表 3。8 组蓄电池，单个电池组容量为 100 kW，蓄电池充放电效率为 $\eta_c = 1/\eta_d = 0.96$ ，最大最小荷电状态分别为 $SOC_{\max} = 0.9$ ， $SOC_{\min} = 0.2$ 。

表 1 柴油发电机和风光出力限值

Table 1 Limits of diesel generator, wind and photovoltaic

类型	功率/kW		爬坡速率/(kW/min)
	下限	上限	
柴油机 1	20	80	0.5
柴油机 2	47	160	1
风机	0	350	—
光伏	0	250	—

表 2 柴油发电机与蓄电池参数

Table 2 Parameters of DG and ESS

类型	DG1	DG2	ESS
寿命/年	15	15	10
安装成本/(元/kW)	10 000	12 500	25 340
容量因素	0.242	0.441	0.176
运行管理系数/(元/kW)	0.035	0.053	0.032 2

表 3 各出力单元的污染气体排放系数

Table 3 Pollutant emission coefficient of each unit

污染气体种类	污染气体排放系数/(g/kWh)			
	WT	PV	DG1	DG2
NO _x	0	0	4.331 4	4.595 4
CO ₂	0	0	232.03	254.26
CO	0	0	2.320 4	2.440 8
SO ₂	0	0	0.464 1	0.493 1

该微网内 3 类负荷组成如图 2 所示，风光预测出力如图 3 所示。

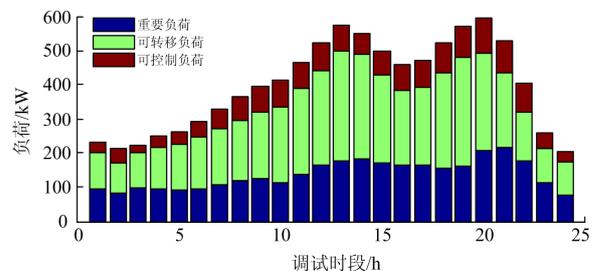


图 2 孤岛微网内 3 类负荷组成

Fig. 2 Three kinds of loads composition of the island micro-grid

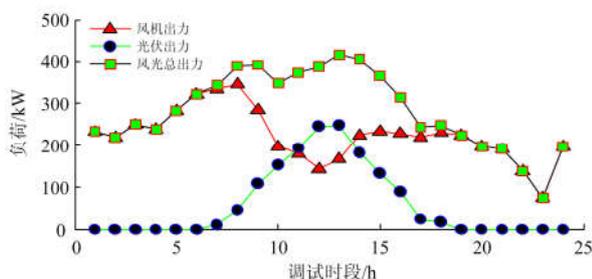


图 3 风电、光伏出力预测值

Fig. 3 Prediction of wind and photovoltaic

将一天分为峰平谷 3 个时段分析。用电低谷时段为 00:00—07:00、23:00—24:00；用电平时段为 07:00—10:00、15:00—18:00、21:00—23:00；用电高峰时段为 10:00—15:00、18:00—21:00。平均电价 $Q_t=0.55$ ，上调比例 $\varphi_p=0.25$ ，下调比例 $\varphi_v=0.4$ ，自弹性系数和交叉弹性系数按文献[21]分别取 -0.2、0.033。PMODE 算法中取种群规模为 60，迭代次数为 2 000。

4.1 PMODE 算法性能分析

为验证 PMODE 算法深度寻优性能的优越性，本文分别采用 NSGA-II 算法^[18]、MODE 算法^[14]和 PMODE 算法对上述模型进行优化求解，得到图 4 所示 3 种算法的 Pareto 最优前沿。

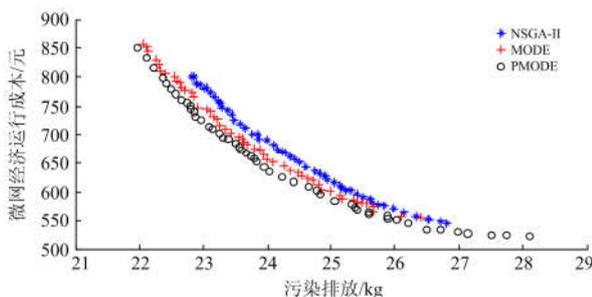


图 4 3 种算法得到的 Pareto 最优前沿

Fig. 4 Pareto optimal front obtained by three methods

由图 4 可看出，本文算法相比于 NSGA-II 和常规 MODE 算法所得到 Pareto 解集分布得更加平滑、均匀。表 4 列出 3 种算法所获得的极端解、最优解和折衷解，分析可知，利用本文 PMODE 算法求得的微网运行成本和污染排放极端解分别为 520.790 7 元和 21.972 1 kg，相比于其他两种算法，结果均有明显降低；PMODE 与 MODE 所得的折衷解较为接近，运行成本分别为 635.374 4 元，658.193 1 元，污染排放分别为 24.045 6 kg，23.997 5 kg，优化结果均优于 NSGA-II 所得结果。

为说明算法的并行效率，分别设置 PC 串行方式、双核和四核 3 种方式运行，结果如表 5 所示。

表 4 3 种算法得到的极端解和最优折衷解

Table 4 The extreme solution and the compromise solution of three kinds of algorithms

算法	目标	运行成本/元	污染排放/kg
NSGA-II	成本最优	545.850 9	26.811 5
	排放最优	801.144 5	22.817 5
	最优折衷解	643.697 4	24.600 7
MODE	成本最优	555.617	26.413 2
	排放最优	856.493 2	22.049 0
	最优折衷解	658.193 1	23.997 5
PMODE	成本最优	520.790 7	28.126 7
	排放最优	849.720 4	21.972 1
	最优折衷解	635.374 4	24.045 6

表 5 运行参数对比

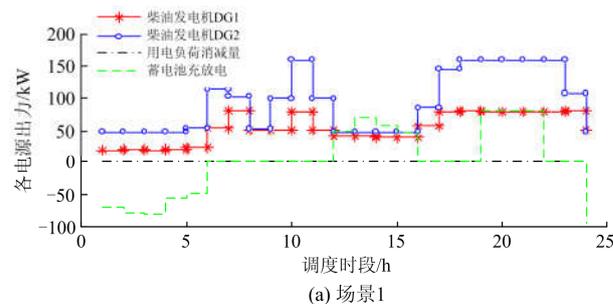
Table 5 Comparison of operating parameters

计算单元	CPU	T/s	Cel	Eff
单核	36%	36.655 8	1	1
双核	64%	19.443 2	1.885 3	0.942 6
四核	100%	10.701 5	3.425 2	0.856 3

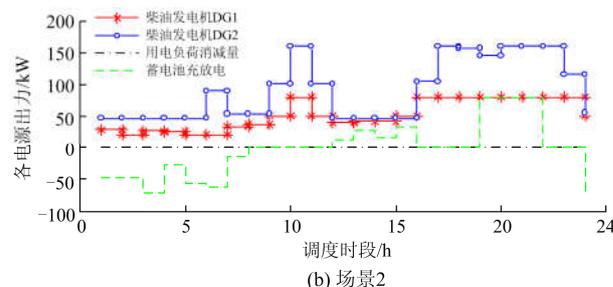
分析表 5 可知：相比串行方式下的 CPU 利用率低，程序运行时间长，双核、四核的 CPU 利用率分别提高了 77.8%和 177.8%，时间上分别缩短了 47.01%和 70.8%；在运行加速比上双核运行达到了 1.885 3 倍，四核达到了 3.425 2 倍，但由于多核种群之间通信频率增大，会导致线程效率有所下降。

4.2 计及需求响应的微网源荷协调调度结果分析

本文设置 3 种场景：场景一为没有需求侧响应参与的微网调度，场景二为未对负荷分类，基于负荷整体参与 1.1 节的价格型需求响应的微网调度，场景三为本文分类负荷需求响应的微网调度。图 5 中给出了 3 种场景下的优化调度结果。



(a) 场景1



(b) 场景2

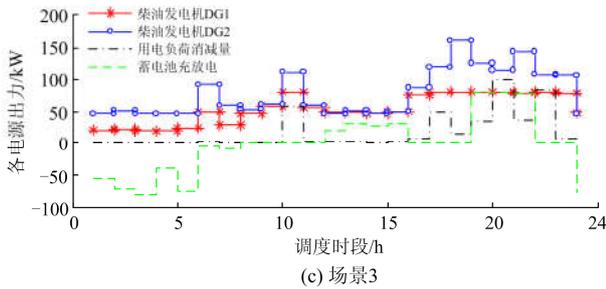


图 5 3 种场景的优化调度结果

Fig. 5 Optimal scheduling results of three scenarios

场景三分类负荷需求响应结果如图 6 所示。

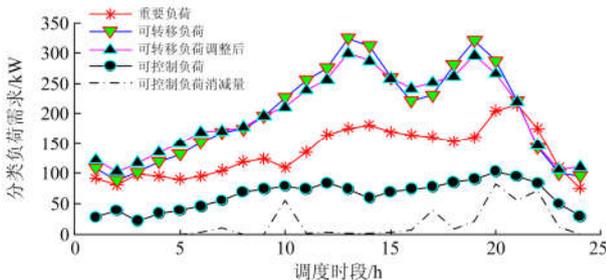


图 6 分类负荷需求响应结果

Fig. 6 Demand response based on load classification

表 6 列出 3 种场景的运行经济成本、污染气体排放量、风光消纳率和负荷峰谷比。

表 6 3 种场景优化结果

Table 6 Results of three scenarios

场景	运行成本/元	污染排放/kg	风光消纳率	负荷峰谷比
场景一	711.233 8	39.028 7	0.853 9	2.95
场景二	655.285 5	31.176 5	0.904 5	2.37
场景三	654.374 4	24.045 6	0.923 7	2.11

综合分析可以得知：

1) 有需求侧响应参与的场景二、场景三相比于场景一在运行成本上分别减少了 7.8%、7.4%，污染排放分别减小了 20.12%、38.39%，风光消纳率分别提升了 5.92%、8.17%，同时负荷峰谷比下降了 19.67%、28.47%。分析原因可知：由于风电光伏具有明显的反负荷调节特性，负荷处于低谷时段，风光出力较多，除供给负荷外，向储能充电，当达到储能最大充电容量或最大荷电状态时，系统出现弃风弃光；当负荷处于平时段时，储能系统处于保持状态，风光接入容量有限，柴油机不得不频繁改变出力；当负荷处于峰时段时，风光资源较少，储能放电至最大放电容量，柴油机以接近满发的状态才能维持系统功率平衡。这种运行方式不利于系统安全稳定运行，同时，也大大增加了微网的运行成本。

2) 对比分析场景二和场景三可知，在进行负荷

分类后，微网调度成本为 654.374 4 元，较未分类成本略有降低，而污染排放量 24.045 6 kg 较未分类有大幅降低，这是由于负荷分类以后增加了可控制负荷的削减成本，减少了柴油机出力。进一步分析，当负荷处于低谷时段时，场景二中的负荷迁入率要高于场景三，导致前者储能充至最大荷电状态时间延长，在谷时段内储能面临不能有效充满进而导致峰时段放电电量不足的风险，最终影响经济效益；当负荷处于平时段时，储能保持当前荷电状态，场景二中的负荷依赖于柴油机反复调节，场景三中的负荷可由柴油机和可控制负荷共同调节，这时柴油机出力相对平稳；当负荷处于高峰时段时，除储能和风光有效供电外，场景二中的柴油机常处于满发状态才能满足负荷需求，而场景三中由于可控制负荷配合柴油机出力进行了有效削减，使得机组不必深度调峰，减少了由发电机出力而产生的污染气体排放，同时，由于可控制负荷及时削减，使得负荷的峰谷比明显降低。

综上分析，具备更佳源荷协调性的分类负荷需求响应在提高系统供电稳定性的同时，可有效降低微网运行成本、污染排放量和负荷峰谷比，并提高新能源的消纳率。

5 结论

基于充分挖掘需求侧资源并结合供应侧进行协同调度的思想，本文设计了分类负荷需求响应模型、储能设备充放电模型，构建了以系统运行成本及污染排放最小化为目标函数的微网源荷协调优化调度模型，并提出了高效的并行优化求解算法，本文所提模型和算法的优越性在于：

1) 根据用电特性将负荷分为重要负荷，可转移负荷和可控制负荷，针对负荷属性不同，分类考虑需求响应，使得模型构建更为合理、科学，同时也为协同供应侧调度创造条件，可有效实现节能减排和提升风光消纳率。

2) 通过在 MODE 算法基础上进行多核集群并行协同进化，不仅能获得较高的运算加速比，同时还能充分利用不同子种群的优势基因差异，提高了 Pareto 非被占优解的选择范围，克服算法“早熟”，实现深度寻优。

本文分类负荷需求响应建模和并行优化方法还可拓展应用到含大规模可再生能源并网的电力系统中，实现面向智能电网的源荷协调优化调度。

参考文献

[1] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李瑞超, 等. 基于物理系统的孤岛微

- 网实时调度的一致性协同算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1471-1480.
- LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Ruichao, et al. Coherent collaborative algorithm for real-time scheduling of island piconets based on physical systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1471-1480.
- [2] ZHANG Fan, ZHAO Huiying, HONG Mingguo. Operation of networked microgrids in a distribution system[J]. CSEE Journal of Power & Energy System, 2016, 1(4): 12-21.
- [3] 唐巍, 高峰. 考虑用户满意度的户用型微电网日前优化调度[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 140-148.
- TANG Wei, GAO Feng. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 140-148.
- [4] 孙川, 汪隆君, 许海林. 用户互动负荷模型及其微电网日前经济调度的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2009-2015.
- SUN Chuan, WANG Longjun, XU Hailin. An interaction load model and its application in microgrid day-ahead economic scheduling[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2009-2015.
- [5] 张忠, 王建学, 曹晓宇. 基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 17-23, 109.
- ZHANG Zhong, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Island microgrid energy management based on load classification scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 17-39, 109.
- [6] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
- XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [7] 梁捷. 基于可中断负荷分级削减的发电调度模型研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 61-66.
- LIAN Jie. Study on power generation scheduling model based on hierarchical reduction of interruptible load[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 61-66.
- [8] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 102-111.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Coordination and optimization scheduling model of “source-network-load-reserve” compatible with demand side resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111.
- [9] 何舜, 郑毅, 蔡旭, 等. 基于荷-储型微网的需求侧管理系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 15-20.
- HE Shun, ZHENG Yi, CAI Xu, et al. Demand side management system operation optimization based on charge-storage type microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 15-20.
- [10] ADIKA C O, WANG L F. Autonomous appliance scheduling for household energy management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 673-682.
- [11] LOGEN T, SRININ A D, KHAMABADKONE A, et al. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 925-933.
- [12] 郭帅, 刘鲁嘉, 杨萌, 等. 计及可控负荷的微网自治调度模型[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 48-56.
- GUO Shuai, LIU Lujia, YANG Meng, et al. Autonomous scheduling model for microgrid considering controllable loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 48-56.
- [13] 齐先军, 程桥, 吴红斌, 等. 激励型需求响应对配电网运行可靠性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5319-5326.
- QI Xianjun, CHENG Qiao, WU Hongbin, et al. Impact of incentive-based demand response on operational reliability of distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5319-5326.
- [14] PENG C, SUN H, GUO J, et al. Multi-objective optimal strategy for generating and bidding in the power market[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 57(1): 13-22.
- [15] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 35-44.
- WANG Beibei, LIU Xiaocong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 35-44.
- [16] 刘故帅, 肖异瑶, 贺禹强, 等. 考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 31-37.
- LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 31-37.

- [17] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [18] PATTANAİK J K, BASU M, DASH D P. Opposition-based differential evolution for hydrothermal power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 40-56. DOI: 10.1186/s41601-017-0033-5.
- [19] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.
PENG Chunhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective programming of distributed power supply based on time series characteristic analysis of K-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [20] 舒航, 李强, 郑琴. 基于并行粒子群优化算法的变分资料同化[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(6): 583-590.
SHU Hang, LI Qiang, ZHENG Qin. Variational data assimilation based on parallel particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 15(6): 583-590.
- [21] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.
BIE Chaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal scheduling of wind power system considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.

收稿日期: 2018-03-29; 修回日期: 2018-05-23

作者简介:

彭春华(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化调度、微电网优化运行与控制; E-mail: chinapch@163.com

刘兵(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化运行; E-mail: liubingscholar@163.com

左丽霞(1982—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统优化运行。

(编辑 葛艳娜)