

DOI: 10.7667/PSPC180448

基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度

陈丽萍¹, 林晓明¹, 许苑¹, 李涛¹, 林琳¹, 黄春艳²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 广州奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 提高能源利用率是实现能源可持续发展的重要举措。基于能源集线器的概念, 提出了微能源网的通用化建模方法, 得到线性的功率平衡方程。进一步地, 以系统总收益最大化和能源利用率最大化为优化目标, 构建了微能源网多目标优化调度模型。结合加权和法在 Matlab 和 GAMS 软件上求解得到多目标优化调度模型的 Pareto 前沿, 并采用模糊隶属度函数求取最优折中解, 作为多目标优化调度方案。最后, 构建典型的微能源网进行验算。结果表明, 所提出的通用化建模方法具有直观性和通用性, 所提出的多目标优化调度模型能为调度决策者提供多维度的调度方案, 兼顾了系统运行的经济性和高效性。

关键词: 能源集线器; 微能源网; 能源利用率; 多目标优化

Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub

CHEN Liping¹, LIN Xiaoming¹, XU Yuan¹, LI Tao¹, LIN Lin¹, HUANG Chunyan²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Limited, Guangzhou 510620, China;

2. Guangzhou Power Electrical Technology Company Limited, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Improving energy efficiency is an important measure to achieve sustainable energy development. Based on the concept of energy hub, a generalized modeling method for micro energy grid is proposed and the linear power balance equation is obtained. Further, aiming at maximum revenue and maximum energy efficiency, the multi-objective optimal dispatch model for micro energy grid is established, where the Pareto frontier is obtained by Matlab and GAMS software combined with weighted sum method. And the fuzzy membership function is adopted to obtain the optimal compromise solution, which is used as a multi-objective optimal dispatch scheme. Finally, a typical micro energy grid is constructed for simulation, where the results suggest that the proposed generalized modeling method is intuitive and versatile and the proposed multi-objective optimal dispatch model can provide multi-dimensional dispatch schemes for decision makers, taking into account both the system operational economy and efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777077) and Planning Program of Guangzhou Power Supply Bureau (No. 030100QQ00170002).

Key words: energy hub; micro energy grid; energy efficiency; multi-objective optimization

0 引言

当前化石能源日渐枯竭和环境污染日趋严峻, 能源结构亟待转型升级, 追求能源的高效利用、清洁环保和可持续发展是能源领域的趋势^[1-2]。微能源网作为终端能源系统, 有利于实现多能互补、提高能源利用率, 是未来能源的主要承载形式之一^[3-5]。

微能源网的运行机理和优化运行一直是国内外

研究的热点方向。微能源网实现电/气/热等多种能源相互耦合的核心是能源集线器(Energy Hub, EH), 微能源网运行机理的研究主要是围绕 EH 建模展开的。苏黎世联邦理工学院于 2007 年首次提出采用耦合矩阵描述 EH 内部的能源转换和分配关系的建模方法^[6], 该方法被广泛地应用于微能源网的稳态分析和优化运行^[7-8]。文献[9]对两类具体的 EH 进行建模分析; 文献[10]从供给侧、转换组件和负荷侧建立微能源网的模型, 在供给侧考虑可再生能源和 P2G 设备、在负荷侧考虑储能设备、转换环节采用 EH 的建模方法描述能源的转换关系。文献[9-10]均

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777077); 广州供电局规划专题项目(030100QQ00170002)

是针对具体的 EH 进行建模分析, 对复杂系统的建模难度大, 缺乏通用性。文献[11]构建了 EH 的通用模型, 但是能源分配系数的引入, 使得原本可线性化的方程非线性化, 增加了建模的复杂性。因此, 目前研究对微能源网仍缺乏直观、易行和通用的建模方法。

微能源网运行是在满足安全约束的前提下, 采用不同目标, 合理安排微能源网内部各能源设备的运行^[12-13]。文献[14]以日运行费用最低为目标构建了微能源网运行优化模型; 文献[15]计及光伏、储能和太阳能热交换器, 以能源成本最小为目标建立了居民负荷运行优化模型。然而单目标的优化调度方案, 难以适应复杂的综合能源供用环境和不断转型升级的能源结构^[6]。因此已有文献研究微能源网的多目标协同优化: 文献[16]以经济成本最小化和污染气体排放量最小化为目标, 构建了综合能源系统多目标最优潮流模型; 文献[17]以总费用最低、缺电率最低和减排率最高为目标构建了综合能源系统的多目标协同优化模型。但上述多目标优化模型未考虑微能源网的能源利用率。微能源网为实现多元能源综合利用提供平台, 能源利用率是衡量微能源网高效性和节能性的有效指标, 将能源利用率纳入微能源网优化目标, 追求能源的高效利用, 是实现能源可持续发展的重要举措^[18]。

因此, 本文基于能源集线器模型, 提出了微能源网的通用化建模方法, 并以系统总收益最大化和能源利用率最大化为目标, 构建了微能源网多目标优化调度模型, 最后构建典型的微能源网进行验算。

1 微能源网通用化建模

1.1 微能源网的结构

为了更好地分析微能源网的能量关系, 本文在 EH 模型的基础上, 对微能源网进行数学建模, 微能源网的等效结构如图 1 所示。微能源网包含能源转换、能源储存和可再生能源发电设备, 将可再生能源等效为接于能源转换设备输入端, 能源储存设备接于能源转换设备输出端。微能源网涉及的能源种类为 K 类, 定义从上层能源网购买的能源的功率向量为 $\mathbf{S}^{\text{buy}} = [S_1^{\text{buy}}, S_2^{\text{buy}}, \dots, S_k^{\text{buy}}, \dots, S_K^{\text{buy}}]^T$, S_k^{buy} 为从上层能源网购买 k 类能源的功率; 同理, \mathbf{S}^{sell} 、 \mathbf{W} 、 \mathbf{I} 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{O} 、 \mathbf{Q}^{ch} 、 \mathbf{Q}^{dis} 和 \mathbf{L} 分别为向上层能源网卖出的能源、可再生能源出力、能源转换设备的输入、不流经能源转换设备的能源、能源转换设备的输出、能源储存设备充放能和能源用户的功率向量, 各功率向量的正方向如图 1 所示。

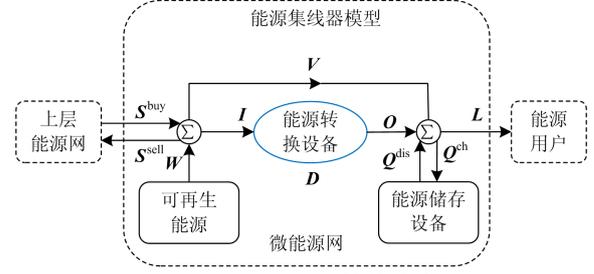


图 1 微能源网的等效结构

Fig. 1 Equivalent structure of micro energy grid

1.2 能源集线器模型

微能源网的调度管理, 需要各能源转换设备的输入和输出功率信息。假设能源转换设备总共有 M 个输入功率、 N 个输出功率, 可将能源转换设备的总输入功率向量 \mathbf{I} 和总输出功率向量 \mathbf{O} 表示为

$$\begin{cases} \mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{P}^{\text{in}} \\ \mathbf{O} = \mathbf{B}\mathbf{P}^{\text{out}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{P}^{\text{in}} = [P_1^{\text{in}}, \dots, P_m^{\text{in}}, \dots, P_M^{\text{in}}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{P}^{\text{out}} = [P_1^{\text{out}}, \dots, P_n^{\text{out}}, \dots, P_N^{\text{out}}]^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{P}^{in} 和 \mathbf{P}^{out} 分别为能源转换设备的输入和输出功率向量; P_m^{in} 为能源转换设备的第 m 个输入功率; P_n^{out} 为能源转换设备的第 n 个输出功率; $\mathbf{A} = (a_{km})_{K \times M}$ 为输入关系矩阵; $\mathbf{B} = (b_{kn})_{K \times N}$ 为输出关系矩阵, 并且满足式(4)、式(5)。

$$a_{km} = \begin{cases} 1, & P_m^{\text{in}} \text{ 属于 } k \text{ 类能源功率} \\ 0, & P_m^{\text{in}} \text{ 不属于 } k \text{ 类能源功率} \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{kn} = \begin{cases} 1, & P_n^{\text{out}} \text{ 属于 } k \text{ 类能源功率} \\ 0, & P_n^{\text{out}} \text{ 不属于 } k \text{ 类能源功率} \end{cases} \quad (5)$$

\mathbf{P}^{in} 和 \mathbf{P}^{out} 满足能源转换设备的功率转换关系:

$$\mathbf{P}^{\text{out}} = \mathbf{D}\mathbf{P}^{\text{in}} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{D} = (d_{nm})_{N \times M}$ 为转换关系矩阵, 并且满足式(7)。

$$d_{nm} = \begin{cases} \eta_{nm}, & P_m^{\text{in}} \text{ 和 } P_n^{\text{out}} \text{ 对应相同设备} \\ 0, & P_m^{\text{in}} \text{ 和 } P_n^{\text{out}} \text{ 对应不同设备} \end{cases} \quad (7)$$

式中, η_{nm} 为 P_m^{in} 和 P_n^{out} 之间的稳态转换效率, 可视为常数。

1.3 输入和输出端功率平衡方程

能源转换设备的输入端, 含有上层能源网的能源输入和可再生能源出力; 能源转换设备的输出端, 含有能源用户和能源储存设备的充放能。因此, 输入输出端的功率平衡方程可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{S}^{\text{buy}} - \mathbf{S}^{\text{sell}} + \mathbf{W} = \mathbf{I} + \mathbf{V} \\ \mathbf{V} + \mathbf{O} = \mathbf{L} + \mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (8)$$

将式(1)和式(6)代入式(8), 可得

$$\mathbf{S}^{\text{buy}} - \mathbf{S}^{\text{sell}} + \mathbf{W} = \mathbf{F}\mathbf{P}^{\text{in}} + \mathbf{L} + \mathbf{Q}^{\text{ch}} - \mathbf{Q}^{\text{dis}} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{F} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}) = (f_{km})_{K \times M}$, 为中间关系矩阵。

综上所述, 微能源网的数学模型可以用式(9)能源功率平衡方程描述, 该模型能量关系均为常系数线性方程, 包含各能量转换设备的输入和输出功率, 具有直观性、通用性和实用性。

2 微能源网多目标优化调度模型

2.1 优化目标

本文构建的微能源网的多目标优化调度模型, 优化目标考虑微能源网总收益最大和能源利用率最大, 具体叙述如下。

1) 系统总收益最大

系统总收益由买卖能源的收益 C_E 、设备运行维护费用 C_{OM} 和碳税费用 C_{CO_2} 构成。

$$\max f_1 = C_E - C_{OM} - C_{CO_2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_E = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{k=1}^K (c_{k,t} L_{k,t} + c_{k,t}^{\text{sell}} S_{k,t}^{\text{sell}} - c_{k,t}^{\text{buy}} S_{k,t}^{\text{buy}} - c_{k,t}^{\text{re}} W_{k,t}) \Delta t \right) \\ C_{OM} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^M c_{d,m} P_{m,t}^{\text{in}} + \sum_{k=1}^K c_{s,k} (Q_{k,t}^{\text{dis}} + Q_{k,t}^{\text{ch}}) \right) \\ C_{CO_2} = \sum_{t=1}^T c_c \sum_{k=1}^K a_k S_{k,t}^{\text{buy}} \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

式中: Δt 和 T 分别为优化时间间隔和优化总时段; $L_{k,t}$ 为 t 时段 k 类能源用户功率; $S_{k,t}^{\text{buy}}$ 和 $S_{k,t}^{\text{sell}}$ 分别为 t 时段微能源网与上层能源网买卖 k 类能源的功率; $W_{k,t}$ 为 t 时段可再生能源 k 类能源的输出功率; $c_{k,t}$ 为 t 时段微能源网向用户销售 k 类能源的价格; $c_{k,t}^{\text{buy}}$ 和 $c_{k,t}^{\text{sell}}$ 分别为 t 时段微能源网与上层能源网买卖 k 类能源的价格; $c_{k,t}^{\text{re}}$ 为 t 时段可再生能源 k 类能源的价格; $P_{m,t}^{\text{in}}$ 为 t 时段能源装换设备的 m 个输入功率; $Q_{k,t}^{\text{ch}}$ 和 $Q_{k,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段 k 类能源储存设备的充放能功率; $c_{d,m}$ 和 $c_{s,k}$ 分别为能源转换设备 m 个输入功率和 k 类能源储存设备的运行维护系数; a_k 为 k 类能源 CO_2 排放系数; c_c 为单位碳排放成本系数。

2) 能源利用率最大

本文所述的能源利用率定义为系统能源总输

出与总能源输入之比^[19]。

$$\max f_2 = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (L_{k,t} + S_{k,t}^{\text{sell}})}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (S_{k,t}^{\text{buy}} + W_{k,t})} \quad (12)$$

2.2 约束条件

所提出的多目标优化调度模型约束条件包括能源功率平衡约束、能源转换和储存设备的运行约束以及能源交互功率约束, 具体叙述如下。

1) 能源功率平衡约束

根据式(9), 系统的能源功率平衡约束为

$$S_{k,t}^{\text{buy}} - S_{k,t}^{\text{sell}} + W_{k,t} = \sum_m f_{km} P_{m,t}^{\text{in}} + L_{k,t} + Q_{k,t}^{\text{ch}} - Q_{k,t}^{\text{dis}} \quad (13)$$

2) 能源转换设备的运行约束

$$\begin{cases} P_{m,\min}^{\text{in}} \leq P_{m,t}^{\text{in}} \leq P_{m,\max}^{\text{in}} \\ -r_{d,m} \Delta t \leq P_{m,t}^{\text{in}} - P_{m,t-1}^{\text{in}} \leq r_{u,m} \Delta t \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{m,\max}^{\text{in}}$ 和 $P_{m,\min}^{\text{in}}$ 分别为能源转换设备第 m 个输入功率的上下限; $r_{d,m}$ 和 $r_{u,m}$ 分别为能源转换设备 m 个输入功率的向下和向上爬坡速率限值。

3) 能源储存设备的运行约束

能源储存设备的能量占比描述如式(15)。

$$\begin{cases} E_{k,1} = E_{k,0} + \frac{Q_{k,1}^{\text{ch}} \eta_k^{\text{ch}}}{\beta_k} \Delta t - \frac{Q_{k,1}^{\text{dis}}}{\beta_k \eta_k^{\text{dis}}} \Delta t \\ E_{k,t} = E_{k,t-1} + \frac{Q_{k,t}^{\text{ch}} \eta_k^{\text{ch}}}{\beta_k} \Delta t - \frac{Q_{k,t}^{\text{dis}}}{\beta_k \eta_k^{\text{dis}}} \Delta t \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{k,0}$ 和 $E_{k,t}$ 分别为 k 类能源储存设备初始时刻和 t 时段的储能占比; η_k^{ch} 和 η_k^{dis} 分别为 k 类能源储存设备的充放能效率; β_k 为 k 类能源储存设备的配置容量。

能源储存设备的储能占比和充放能功率需要在允许的范围内, 而且同一时刻能源储存设备只能进行充能或者放能, 引入表征其充放能状态的 0-1 逻辑变量, 能源储存设备需要满足的约束如式(16)。

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{k,t}^{\text{ch}} \leq u_{k,t}^{\text{ch}} Q_{k,\max}^{\text{ch}} \\ 0 \leq Q_{k,t}^{\text{dis}} \leq u_{k,t}^{\text{dis}} Q_{k,\max}^{\text{dis}} \\ E_{k,0} = E_{k,T} \\ E_{k,\min} \leq E_{k,t} \leq E_{k,\max} \\ u_{k,t}^{\text{ch}} + u_{k,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ u_{k,t}^{\text{dis}}, u_{k,t}^{\text{ch}} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $Q_{k,\max}^{\text{ch}}$ 和 $Q_{k,\max}^{\text{dis}}$ 分别为 k 类能源储存设备的最大充放能功率; $E_{k,T}$ 为 k 类能源储存设备结束时刻的储能占比; $E_{k,\max}$ 和 $E_{k,\min}$ 分别为 k 类能源储存设

备的储能占比上下限; $u_{k,t}^{\text{ch}}$ 和 $u_{k,t}^{\text{dis}}$ 为表征 k 类能源储存设备的充放能状态逻辑变量, 当 k 类能源储存设备充能时 $u_{k,t}^{\text{ch}}$ 为 1, 放能时 $u_{k,t}^{\text{dis}}$ 为 1, 其余情况均为 0。

4) 能源交互功率约束

由于同一时刻, 微能源网与上层能源网之间各类能源的交互功率只能为单向的, 且需要满足一定的范围, 引入表征其买卖能源状态的 0-1 逻辑变量, 能源交互功率需满足的约束如式(17)。

$$\begin{cases} 0 \leq S_{k,t}^{\text{buy}} \leq u_{k,t}^{\text{sell}} S_{k,\max}^{\text{buy}} \\ 0 \leq S_{k,t}^{\text{sell}} \leq u_{k,t}^{\text{buy}} S_{k,\max}^{\text{sell}} \\ u_{k,t}^{\text{sell}} + u_{k,t}^{\text{buy}} \leq 1 \\ u_{k,t}^{\text{buy}}, u_{k,t}^{\text{sell}} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $S_{k,\max}^{\text{buy}}$ 和 $S_{k,\max}^{\text{sell}}$ 分别为微能源网与上层能源网买卖 k 类能源的最大功率; $u_{k,t}^{\text{buy}}$ 和 $u_{k,t}^{\text{sell}}$ 分别为标志 t 时段微能源网与上层能源网能源交易的状态变量, 微能源网买入能源时 $u_{k,t}^{\text{buy}}$ 为 1, 微能源网卖出能源时 $u_{k,t}^{\text{sell}}$ 为 1, 其他情况均取 0。

2.3 求解方法

本文采用加权和法^[20]求解上述微能源网的多目标优化模型, 具体描述为

$$\begin{cases} \max[w \frac{f_1 - F_{1,\min}}{F_{1,\max} - F_{1,\min}} + (1-w) \frac{f_2 - F_{2,\min}}{F_{2,\max} - F_{2,\min}}] \\ \text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{b} \\ w \in \{0, 1/\rho, 2/\rho, \dots, (\rho-1)/\rho, 1\} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 分别为等式约束和不等式约束; $F_{1,\max}$ 和 $F_{1,\min}$ 、 $F_{2,\max}$ 和 $F_{2,\min}$ 分别为优化目标 f_1 和 f_2 的最大值和最小值; w 为优化目标 f_1 的权重, $(1-w)$ 为优化目标 f_2 的权重; ρ 为权重的划分段数。

式(18)描述的模型为混合线性模型(MILP), 可采用 GAMS 软件 CPLEX 求解器进行求解。但是 GAMS 软件只能进行单次求解, 为此在 Matlab 平台上调用 GAMS 软件循环求解, 求取 Pareto 前沿。

最后采用模糊隶属度函数^[21], 求取每个帕累托最优解对应的各目标函数的满意度, 将其标准化后, 选取出具有最大满意度的优化方案, 作为最优折中解。

所述的模糊隶属度如式(19)。

$$\gamma_{i,j} = \frac{f_{i,\max} - f_{i,j}}{F_{i,\max} - F_{i,\min}} \quad (19)$$

式中, $f_{i,j}$ 和 $\gamma_{i,j}$ 分别为第 j 个帕累托最优解第 i 个优

化目标的目标函数值和模糊隶属度。

帕累托最优解的标准化满意度如式(20)。

$$\zeta_j = \frac{\sum_{i=1}^2 \gamma_{i,j}}{\sum_{j=1}^{\rho+1} \sum_{i=1}^2 \gamma_{i,j}} \quad (20)$$

式中, ζ_j 为第 j 个帕累托最优解的标准化满意度。

3 算例

3.1 算例介绍

本文构建的典型微能源网的网络架构如图 2 所示。微能源网内部包含的设备有: 风电、热电联产(CHP)、燃气锅炉(GB)、电锅炉(EB)、储电(ES)和储热(HS)设备。微能源网典型夏季日和典型冬季日的负荷以及风电出力曲线如图 3 所示。参考文献[22], 天然气和传统电厂的 CO_2 排放系数分别为 0.19 kg/kWh 和 0.80 kg/kWh, 碳税为 0.3 元/kg, 微能源网向用户售热价格为 1.0 元/kWh, 电能和天然气价格如图 4 所示^[23]。本文考虑风力发电机为微能源网运营商所有, 因此购入风电价格为 0。微能源网各设备的详细参数见表 1 和表 2。

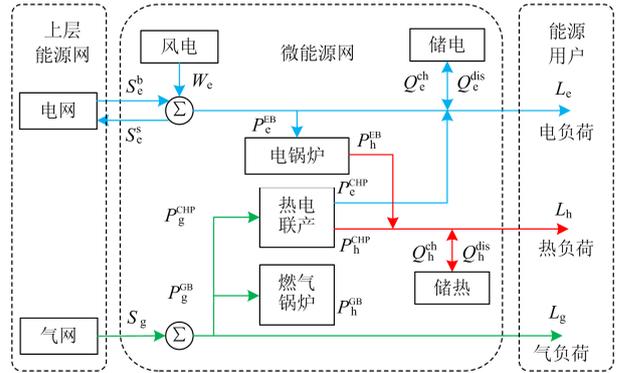


图 2 典型微能源网的网络架构

Fig. 2 Schematic diagram of the typical micro energy grid

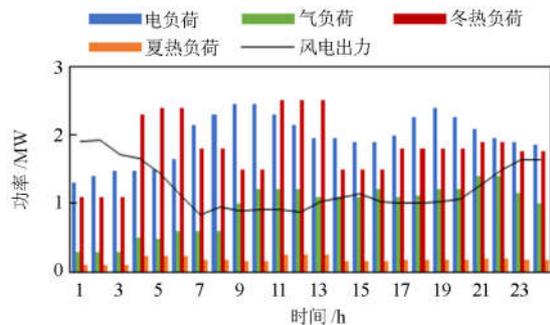


图 3 负荷与风电出力曲线

Fig. 3 Curves of load and wind generation output

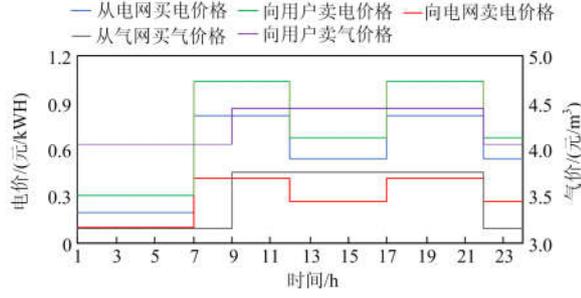


图4 电能和天然气价格曲线

Fig. 4 Price curves of electric power and natural gas

表1 能源转换设备参数

Table 1 Parameters of energy converter

设备	出力 上限/ kW	出力 下限/ kW	向上爬 坡速率/ (kW/h)	向下爬 坡速率/ (kW/h)	效率		维护费/ (元/kW)
					产热 0.35	产电 0.35	
CHP	3 000	0	1 800	1 800	0.35	0.35	0.025
EB	1 500	0	900	900	0.75		0.020
GB	1 500	0	900	900	0.8		0.020

表2 能源储存设备参数

Table 2 Parameters of energy storage

设备	配置容量/kWh	效率	储能占比		维护费/(元 /kW)
			上下限		
ES	1 500	0.9(充/放)	0.8/0.2		0.001 8
HS	1 500	0.9(充/放)	0.9/0.1		0.001 8

3.2 通用化建模过程

根据前述的微能源网通用化建模方法, 具体推导过程如下。

1) 定义各能源功率向量如式(21)。

$$\begin{cases}
 \mathbf{W} = [W_e, 0, 0]^T \\
 \mathbf{S}^{\text{buy}} = [S_e^{\text{buy}}, S_g^{\text{b}}, 0]^T \\
 \mathbf{S}^{\text{sell}} = [S_e^{\text{sell}}, 0, 0]^T \\
 \mathbf{L} = [L_e, L_g, L_h]^T \\
 \mathbf{P}^{\text{in}} = [P_e^{\text{EB}}, P_g^{\text{CHP}}, P_g^{\text{GB}}]^T \\
 \mathbf{P}^{\text{out}} = [P_e^{\text{CHP}}, P_h^{\text{CHP}}, P_h^{\text{GB}}, P_h^{\text{EB}}]^T \\
 \mathbf{Q}^{\text{dis}} = [Q_e^{\text{dis}}, 0, Q_h^{\text{dis}}]^T \\
 \mathbf{Q}^{\text{ch}} = [Q_e^{\text{ch}}, 0, Q_h^{\text{ch}}]^T
 \end{cases} \quad (21)$$

2) 输入关系矩阵 \mathbf{A} 、输出关系矩阵 \mathbf{B} 和转化关系矩阵 \mathbf{D} 如式(22)一式(24)。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & \eta_{\text{CHPe}} & 0 \\ 0 & \eta_{\text{CHPh}} & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\text{GB}} \\ \eta_{\text{EB}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由此得到中间关系矩阵 \mathbf{F} 为

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -\eta_{\text{CHPe}} & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -\eta_{\text{EB}} & -\eta_{\text{CHPh}} & -\eta_{\text{GB}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

3) 将能源功率向量和关系矩阵代入式(9), 得到能源功率平衡方程如式(26)。

$$\begin{bmatrix} S_e^{\text{buy}} - S_e^{\text{sell}} \\ S_g^{\text{b}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\eta_e^{\text{CHP}} & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -\eta_{\text{EB}} & -\eta_h^{\text{CHP}} & -\eta_{\text{GB}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e^{\text{EB}} \\ P_g^{\text{CHP}} \\ P_g^{\text{GB}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_e \\ L_g \\ L_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_e^{\text{ch}} - Q_e^{\text{dis}} \\ 0 \\ Q_h^{\text{ch}} - Q_h^{\text{dis}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

上述矩阵中, W_e 为风电出力功率; 下标 e、h 和 g 分别代表电、热和天然气 3 类能源; 上标 CHP、GB 和 EB 分别代表热电联产机组、燃气锅炉和电锅炉; η_e^{CHP} 、 η_h^{CHP} 、 η_{EB} 和 η_{GB} 分别为 CHP 气转电、CHP 气转热、EB 和 GB 的效率。

3.3 多目标优化调度结果

综合考虑系统总收益最大和能源利用率最大两个优化目标, 当权重系数 w 取值为 $\{0, 0.05, \dots, 0.95, 1\}$ 时, 典型夏季和冬季场景优化得到的 Pareto 前沿如图 5 所示。可以看到, 以系统总收益最大和能源利用率最大为目标的单目标优化结果分别位于 Pareto 前沿的两端; 系统总收益和能源利用率近似成反比关系, 随着能源利用率的提高, 系统总收益将降低, 反之亦然。

通过模糊隶属度函数, 求出两种场景下的最优折中解如图 5 中的红色圆圈表示。两种场景下的最优折中解和单目标 f_1 最优解的结果分别如表 3 所示。

对比夏季和冬季场景, 最优折中解的优化结果, 冬季场景的系统总收益高于夏季场景, 但能源利用率低于夏季场景, 冬季场景的购电量和购气量均大于夏季场景。这是由于冬季场景的热负荷大于夏季场景, 因此需要购买的能源越多, 热能生产过程产

生的损耗更大，系统的能源利用率更低，但是同时系统销售热能的收益更大，系统总收益越大。

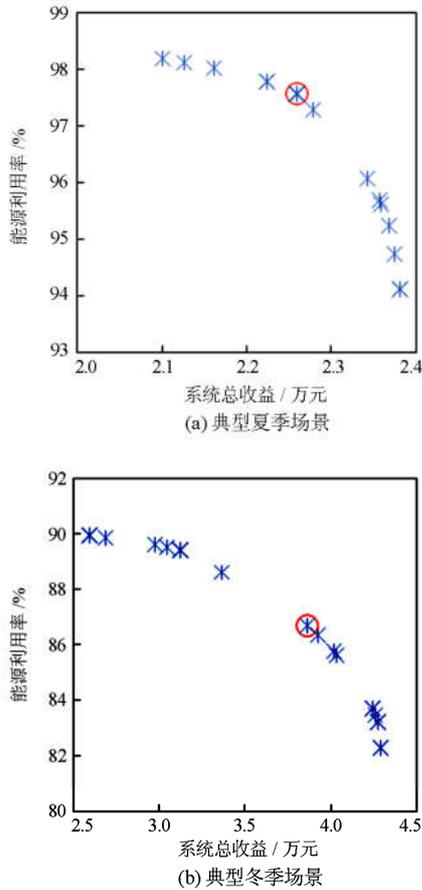


图 5 多目标优化的 Pareto 前沿

Fig. 5 Pareto frontier based on multi-objective optimization

表 3 最优折中解和单目标优化解的结果对比

Table 3 Comparison of the results of optimal compromise solution and single object optimal solution

场景	优化目标	f_1 /万元	f_2 %	购电量/ MWh	购气量/ ($\times 10^3 \text{ m}^3$)
夏季	f_1 最优	2.38	94.1	14.4	3.6
	f_2 最优	1.93	98.5	24.2	2.3
	最优折中解	2.26	97.6	18.9	2.8
冬季	f_1 最优	4.29	82.4	6.3	10.4
	f_2 最优	2.59	90.0	51.5	4.6
	最优折中解	3.86	86.7	27.1	7.6

对比不同的优化目标，最优折中解的优化结果对比单目标 f_1 最优解，系统的总收益降低了，但是能源利用率升高了，这是因为系统使用电能生产热能比使用天然气生产热能更高效，系统更多地使用电能，运行更加节能环保；对比单目标 f_2 最优解，能源利用率降低了，但是系统的总收益提高了，这

是因为使用天然气生产热能比使用电能生产热能更加经济，系统使用更多的天然气，运行经济性更好。由此可见，最优折中解对应的两个优化目标值都相对较优，可作为微能源网多目标优化调度方案。

4 结论

本文提出了基于能源集线器的微能源网的通用化建模方法，构建了微能源网多目标优化调度模型，以系统总收益最大化和能源利用率最大化为目标，并通过模糊隶属度求取最优折中解，最后构建了典型的微能源网进行验证，得到具体结论如下：

- 1) 基于能源集线器的微能源网通用化建模方法，建模过程只需对关系矩阵进行修改，更加简明直观，适用于复杂系统，而且所得模型易于求解；
- 2) 本文所提出的微能源网多目标优化模型，兼顾微能源网运行的经济性和环保性，能够为运行决策者提供多维度的调度方案。采用模糊隶属度确定的最优折中方案，能够有效地权衡系统总收益和能源利用率。

参考文献

[1] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.

[2] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7.
ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, CAI Zexiang, et al. New generation of cyber-energy system: energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.

[3] 孙可, 吴臻, 尚楠, 等. 以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 1-9.
SUN Ke, WU Zhen, SHANG Nan, et al. Provincial regional energy internet framework and development tendency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 1-9.

[4] TRIFONOV T O. Coordination of battery energy storage and power-to-gas in distribution systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 421-428. DOI: 10.1186/s41601-017-0072-y.

- [5] 高志远, 曹阳, 徐昊亮, 等. 电力系统关键技术发展论
刍议[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 14-17.
GAO Zhiyuan, CAO Yang, XU Haoliang, et al. Primary
discussion on the key technologies development of power
system[J]. Power System Protection and Control, 2017,
45(17): 14-17.
- [6] 高峰, 曾嵘, 屈鲁, 等. 能源互联网概念与特征辨识研
究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 10-16.
GAO Feng, ZENG Rong, QU Lu, et al. Research on
identification of concept and characteristics of energy
internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 10-16.
- [7] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型
区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工
程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review
of steady-state analysis of typical regional integrated
energy system under the background of energy internet[J].
Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [8] PARISIO A, DEL VECCHIO C, VACCARO A. A robust
optimization approach to energy hub management[J].
International Journal of Electrical Power & Energy
Systems, 2012, 42(1): 98-104.
- [9] 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.
- [10] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑 P2G 多源储能型微网
日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报,
2017, 37(11): 3067-3077.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research
on optimal day-ahead economic dispatching strategy for
microgrid considering P2G and multi-source energy
storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,
37(11): 3067-3077.
- [11] 王业磊, 赵俊华, 文福拴, 等. 具有电转气功能的多能
源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2015,
39(21): 1-10, 65.
WANG Yelei, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al.
Market equilibrium of multi-energy system with power-
to-gas functions[J]. Automation of Electric Power
Systems, 2015, 39(21): 1-10, 65.
- [12] 赵霞, 杨仑, 瞿小斌, 等. 电-气综合能源系统能流计
算的改进方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 467-477.
ZHAO Xia, YANG Lun, QU Xiaobin, et al. An improved
energy flow calculation method for integrated electricity
and natural gas system[J]. Transactions of China
Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 467-477.
- [13] 张义勇, 王小君, 和敬涵, 等. 考虑供热系统建模的综
合能源系统最优能流计算方法[J]. 电工技术学报,
2019, 34(3): 562-570.
ZHANG Yizhi, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al.
Optimal energy flow calculation method of integrated
energy system considering thermal system modeling[J].
Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,
34(3): 562-570.
- [14] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能
源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018,
42(1): 179-186.
MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. The
energy flow modeling and optimal operation analysis of
micro energy grid based on energy hub[J]. Power System
Technology, 2018, 42(1): 179-186.
- [15] THANHTUNG H A, ZHANG Y J, THANG V V, et al.
Energy hub modeling to minimize residential energy
costs considering solar energy and BESS[J]. Journal of
Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5(3):
389-399.
- [16] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等. 区域综合能源系统多目标
最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017,
37(20): 5829-5839.
LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Multi-
objective optimal hybrid power flow algorithm for
integrated local area energy system[J]. Proceedings of the
CSEE, 2017, 37(20): 5829-5839.
- [17] 曾鸣, 韩旭, 李源非, 等. 基于 Tent 映射混沌优化
NSGA-II 算法的综合能源系统多目标协同优化运行[J].
电力自动化设备, 2017, 37(6): 220-228.
ZENG Ming, HAN Xu, LI Yuanfei, et al. Multi-objective
cooperative optimization based on Tent mapping chaos
optimization NSGA-II algorithm for integrated energy
system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,
37(6): 220-228.
- [18] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综
合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4):
174-182.

- CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182.
- [19] 施锦月, 许健, 曾博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966.
- SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [20] 李兴, 杨智斌, 颜远, 等. 考虑换流站损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 119-125.
- LI Xing, YANG Zhibin, YAN Yuan, et al. Multi-objective reactive power optimal control of AC-DC systems including power loss characteristics of converter stations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 119-125.
- [21] 史旭栋, 高岳林, 韩俊茹. 基于模糊推理的粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 114-124.
- SHI Xudong, GAO Yuelin, HAN Junru. Particle swarm optimization algorithm based on fuzzy reason[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 114-124.
- [22] 吴聪, 唐巍, 白牧可, 等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 20-28.
- WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Energy router based planning of energy internet at user side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 20-28.
- [23] 陈泽兴, 张勇军, 许志恒, 等. 计及需求价格弹性的区域能源中心建模与日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 27-35.
- CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, XU Zhiheng, et al. Modelling and optimal day-ahead dispatch of district energy centre considering price elasticity of energy load demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 27-35.

收稿日期: 2018-04-19; 修回日期: 2018-06-03

作者简介:

陈丽萍(1983—), 女, 硕士, 高工, 研究方向为能源互联网、电网规划; E-mail: chenlp@guangzhou.csg.cn

林晓明(1993—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为能源互联网优化运行; E-mail: 411833214@qq.com

许苑(1984—), 女, 硕士, 高工, 研究方向为智能电网、能源互联网等。Email: xuyuan@guangzhou.csg.cn

(编辑 魏小丽)