

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200789

基于机会约束规划的综合能源微网群协调运行策略研究

苏磊¹, 李振坤², 张智泉², 杜洋¹, 葛晓琳², 杨心刚¹

(1. 国网上海电力科学院, 上海 200000; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

摘要: 随着我国分布式能源系统的迅速发展, 在用能侧出现大量的综合能源微网, 而相邻综合能源微网以微网群的形式协同运行将是综合能源微网今后发展的重要趋势。基于此, 提出了一种适用于综合能源微网群的协调运行方法。该方法旨在协调分属不同利益主体的综合能源微网, 在共享有限信息和彼此独立决策的条件下, 寻求微网群系统的最优运行方案。考虑到综合微网群系统中通常含有较多可再生能源, 为了提高运行方案应对可再生能源出力不确定性的鲁棒性, 采用机会约束规划方法, 以有效抑制不确定性的影响。最后, 通过对含电力-天然气的微网群系统算例进行分析, 结果表明, 与传统集中方法相比, 所提方法能较好提升系统的经济性和安全性, 实现二种特性的权衡。

关键词: 综合能源微网群; 不确定性; 机会约束规划; 协调运行; 分散优化

A coordinated operation strategy for integrated energy microgrid clusters based on chance-constrained programming

SU Lei¹, LI Zhenkun², ZHANG Zhiquan², DU Yang¹, GE Xiaolin², YANG Xingang¹

(1. State Grid Shanghai Electrical Science Institute, Shanghai 200000, China;

2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the rapid development of China's distributed energy system, a large number of integrated energies microgrids appear on the energy-use side, and the coordinated operation of adjacent integrated energy microgrids in the form of microgrid clusters will be an important trend for the future development of integrated energy microgrids. This paper proposes a coordinated operation method suitable for integrated energy microgrid clusters. It aims to coordinate the integrated energy microgrids belonging to different stakeholders and seek the optimal operation scheme of the microgrid cluster system under the condition of sharing limited information and making decisions independently. Considering that the integrated microgrid clusters system usually contains lots of renewable energy, in order to improve the robustness of the scheme to deal with the uncertainty of renewable energy output, a chance-constraint programming method is adopted to effectively curb the influence of uncertainty. Finally, by analyzing a microgrid cluster system with electric power and natural gas, the results show that the proposed method can improve the economy and security of the system and realize the tradeoff between the two characteristics.

This work is supported by the the National Natural Science Foundation of China (No. U2066214) and the Project of State Grid Shanghai Electric Power Company (No. SGSHDK00DYJS 1900179).

Key words: integrated energy microgrid clusters; uncertainty; chance-constrained programming; coordinated operation; decentralized optimization

0 引言

能源是经济社会发展的物质基础。近年来, 我

国经济保持着稳中求进的良好发展势头, 随着现代化水平的提高, 人民对能源的需求量日益加大, 能源供给面临挑战。能源紧缺、环境污染以及气候变化是当今世界制约经济社会可持续发展的重要因素^[1-4]。我国能源短缺问题突出, 且能源消费强度是世界平均水平的两倍, 达到了0.36吨标准煤/万元^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2066214); 国网上海市电力公司项目资助(SGSHDK00DYJS 1900179)

因此，大力开发清洁能源、发展含多种能源的综合能源系统、实现能源的集约与高效利用成为解决能源短缺问题的关键途径。因此，在用能侧出现大量分属不同利益主体的综合能源微网，而相邻综合能源微网以微网群的形式协同运行将是综合能源微网今后发展的重要趋势^[6-8]。

目前，国内外在该领域的研究成果较少，代表性文献有：文献[9]提出了一种解决电力和天然气输配网络相互依赖的协调优化模型，该模型可在天然气高度依赖的条件下为系统运营商提供最佳的短期机组组合和电力调度策略。文献[10]设计了一种适用于电力和天然气市场的日前优化调度方法，以实现电力-天然气系统的运行成本最小化。文献[11]针对综合能源微网群系统，提出了一种分散最优能量流法，并采用迭代交替方向乘子法算法进行收敛求解。但由于可再生能源发电的随机性，文献[11]忽略了双向功率和气体转换。更重要的是，虽然电力和天然气输送系统的运行是高度相互依赖的，但在实际运行中，它们是由不同的运营商在不同的市场规则下控制的。此外，越来越多的可再生能源(如风能和太阳能)，由于其清洁和可持续的特点，已接入综合能源微网群系统。因此，可再生能源和负荷预测的误差使得系统运营商处理日前调度问题具有挑战性^[12]。以这种方式使用的随机规划方法，如机会约束规划(CCP)允许系统操作员在可接受的置信水平内作出决策，作为处理普遍不确定性的一种有效技术^[13]。综上所述，目前已有研究存在以下不足：

1) 上述研究成果大多采用集中优化策略，故该类方法需要一个中央调度中心来维持整个系统的运行状态。随着相互连接的综合能源微网群在地理上的扩展，综合能源微网群优化问题的规模不断扩大。因此，在这种情况下，较大的通信负担、信息隐私和不同利益主体微网运行决策者的独立性使得传统集中优化方法不再适用于综合能源微网群。2) 大部分研究主要针对微电网群，针对综合能源微网群的研究较少，而多能耦合特性使得综合能源微网群的协调运行方法要明显比微电网群的复杂，此外，随着综合能源微网群中可再生能源不断增多，受可再生能源出力不确定性的影响，分属不同利益主体的综合能源微网群的日前优化调度将更为复杂。

基于已有研究成果，本文提出了一种考虑可再生能源出力和负荷预测不确定性的电力-天然气综合能源微网群系统的优化运行策略。该方法充分考虑单个综合能源微网运营商的信息隐私性和决策独

立性，确保每个微网运营商的最优协作，以实现综合能源微网群系统的安全经济运行。具体创新点为：

1) 提出了一种基于完全分散决策式框架的综合能源微网群日前优化运行方法，该方法可实现群内综合能源微网在各自决策基础下运行，并通过定期共享有限信息来实现群内的协同运行，以保障个体微网运营商的信息隐私性和决策独立性。

2) 本文在日前优化运行模型中还增加采用机会约束，以解决群内可再生能源和负荷的不确定性，提升本文所提方法的可靠性。

3) 针对上述复杂优化运行模型，本文提出了一种分层迭代算法。该算法分为内层循环和外层循环两个部分。内部循环解决个体综合能源微网内不同能源间的协同运行问题，其中电转气(P2G)和气转电(NGU)作为耦合设备；外部循环则解决微网间的协同运行问题，其中本文分别用虚拟发电机、虚拟负荷和虚拟节点对微网间耦合设备(电力联络线和天然气管道)进行等效处理。

1 综合能源微网群的协调运行框架

图 1 为一种分散型电力-天然气综合能源微网群的协调运行框架。每个综合能源微网均由电力部分、天然气部分和能量耦合部分组成，并具有自己的调度中心 MGO，调度中心除了要管理所在区域内的能源生产与消费，同时还需要与其他微网的调度中心共享部分信息进行协同运行。每个微网是相互独立运行的，在不影响各自系统的数据隐私性和满足各自系统约束条件的前提下，以寻求协同运行满足特定目标的最优运行点。

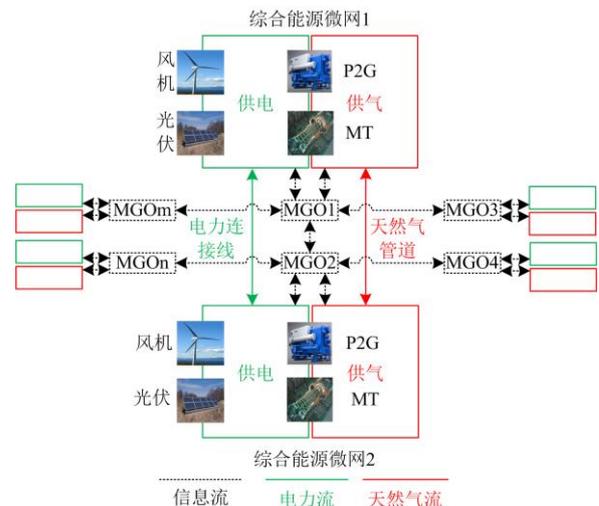


图 1 综合能源微网群的协调运行框架

Fig. 1 Coordinated operation framework of integrated energy microgrid clusters

2 综合能源微网群的协调运行建模

由于综合能源微网群结构复杂, 既有电力部分和天然气部分分别互联协同运行, 又有电力部分与天然气部分的耦合运行。此外, 考虑到电力部分通常包含大量可再生能源, 其具有较强的出力不确定性, 因此, 在建立协调运行模型时需要充分考虑其不确定性^[14]。

2.1 综合能源微网电力部分建模

微网内电力部分通常由火电机组、风机、光伏和负荷组成, 考虑到风机和光伏的出力具有较强不确定性, 本文采用随机优化法对上述部分进行建模。该部分优化运行的目标函数为火电机组的发电成本最小, 如式(1)所示。

$$C_{\text{gen}}^{MG\alpha} = \sum_{t \in T} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (1)$$

式中: $C_{\text{gen}}^{MG\alpha}$ 表示综合能源微网 α 电力部分的发电成本; t 为优化时间; T 为时间周期; e 表示电力部分; $P_{i,t}$ 为微网中火电机组 i 在 t 时刻的出力大小; a_i 、 b_i 和 c_i 为微网中火电机组 i 的发电成本系数。此外, 为了保障系统安全经济运行, 本文建立的电力部分机会约束条件为

$$\Pr \left\{ \sum_{i \in \phi_{\text{TU}}^{\alpha}} [P_{i,t} + R_{i,t}] + \sum_{w \in \phi_{\text{WT}}^{\alpha}} P_{w,t} + \sum_{s \in \phi_{\text{SO}}^{\alpha}} P_{s,t} - \sum_{v \in \phi_{\text{P2G}}^{\alpha}} P_{v,t} \geq \sum_{d \in \phi_{\text{MG}}^{\alpha}} PD_{d,t} \right\} \geq 1 - \xi_t \quad (2)$$

$$\Pr \{ -PL_l \leq PL_{l,t} \leq PL_l \} \geq 1 - \psi_t \quad (3)$$

$$PL_{l,t} = \sum_{i \in \phi_{\text{TU}}^{\alpha}} SF_{l,i} P_{i,t} + \sum_{w \in \phi_{\text{WT}}^{\alpha}} SF_{l,w} P_{w,t} + \sum_{s \in \phi_{\text{SO}}^{\alpha}} SF_{l,s} P_{s,t} - \sum_{d \in \phi_{\text{MG}}^{\alpha}} SF_{l,d} P_{d,t} - \sum_{v \in \phi_{\text{P2G}}^{\alpha}} SF_{l,v} P_{v,t} \quad (4)$$

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq U_i \quad (6)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq D_i \quad (7)$$

$$R_{i,t} = \min \{ R_i^{\max}, P_i^{\max} - P_{i,t} \} \quad (8)$$

$$P_{w,t} : E(P_{w,t}) + \varphi(\mu_{w,t}, \sigma_{w,t}^2) \quad (9)$$

$$P_{s,t} : E(P_{s,t}) + \varphi(\mu_{s,t}, \sigma_{s,t}^2) \quad (10)$$

$$PD_{d,t} : E(PD_{d,t}) + \varphi(\mu_{d,t}, \sigma_{d,t}^2) \quad (11)$$

式中: $\phi_{\text{TU}}^{\alpha}$ 、 $\phi_{\text{WT}}^{\alpha}$ 、 $\phi_{\text{SO}}^{\alpha}$ 、 $\phi_{\text{P2G}}^{\alpha}$ 和 $\phi_{\text{MG}}^{\alpha}$ 分别为综合能源微网 α 中火电机组集合、风电机组集合、太阳能发电机组集合、电转气装置集合和负荷需求集合; PL_l 为综合能源微网支路容量; SF_l 为平移因子; ξ_t

和 ψ_t 分别为失负荷概率和过负荷概率; U_i 和 D_i 分别为火电机组上调常数和下调常数; R_i 为火电机组的备用容量; $E(\cdot)$ 为随机变量的期望值; $\varphi(\cdot)$ 为概率分布函数; μ 和 σ 分别为平均值和方差。式(2)为在给定负荷损失概率 ξ_t 约束条件下, 火电机组需要提供足够的容量储备以适应风能、太阳能和负荷预测误差造成的有功平衡偏差; 式(3)为电力部分潮流过载概率小于给定值 ψ_t ; 式(4)为电力部分潮流平衡约束; 式(5)~式(8)分别为火电机组出力约束、爬坡约束、下降约束和备用容量约束。式(9)~式(11)分别为风能、太阳能发电和电力负荷的随机约束, 其中, 风电和太阳能预测误差随机变量采用均值为 0 的正态分布^[15]、负荷预测误差随机变量采用均值为 0 的截断正态分布^[16]; 由于预测误差分布与预测方法/工具的准确性密切相关, 故假设风能、太阳能发电和电力负荷的预测误差为独立的^[17]。

2.2 综合能源微网天然气部分建模

微网内天然气部分通常包含气源、储气装置和气负荷。故该部分优化运行的目标为气源的生产成本和储气装置的运行成本最小化, 如式(12)所示。

$$C^{MG\alpha} = \sum_{t \in T} p_{\text{gas}} G_{\text{gs},t} + \sum_{t \in T} \delta (GS_{\text{ch},t} + GS_{\text{disch},t}) \quad (12)$$

式中: p_{gas} 为天然气价格; $G_{\text{gs},t}$ 为 t 时刻气源 gs 气体产量; δ 为气体储存系统的运行成本系数; $GS_{\text{ch},t}$ 和 $GS_{\text{disch},t}$ 分别为 t 时刻储气系统的充放电功率。与电存储装置相比, 气体储存系统属于一种节约成本的设备, 其中储气罐的降解成本比电池的降解成本要小得多。但由于气体储存系统存在充放同时性, 因此其运行成本较高。此外, 考虑到天然气部分的潮流要明显缓慢于电力部分, 本文采用线性暂态模型^[18-21]来获取协调系统的物理特性。因此, 天然气部分的运行约束为

$$\frac{1}{S_{mn}} [f_{mn,t+1}^{\text{out}} + f_{mn,t+1}^{\text{in}} - f_{mn,t}^{\text{out}} - f_{mn,t}^{\text{in}}] + \frac{\gamma \omega_{mn} \Delta t}{4d_{mn} S_{mn}} [f_{mn,t+1}^{\text{out}} + f_{mn,t+1}^{\text{in}} + f_{mn,t}^{\text{out}} + f_{mn,t}^{\text{in}}] + \quad (13)$$

$$\frac{\Delta t}{L_{mn}} [\pi_{n,t+1} - \pi_{m,t+1} + \pi_{n,t} - \pi_{m,t}] = 0$$

$$\frac{Q_{\text{avg}} R_g \varepsilon_{\text{avg}} \Delta t}{L_{mn} S_{mn}} [f_{mn,t+1}^{\text{out}} + f_{mn,t+1}^{\text{in}} - f_{mn,t}^{\text{out}} - f_{mn,t}^{\text{in}}] + \quad (14)$$

$$[\pi_{n,t+1} + \pi_{m,t+1} - \pi_{n,t} - \pi_{m,t}] = 0$$

$$\sum_{n \in \phi_{\text{GN}}^{\alpha}(m)} f_{nm,t}^{\text{out}} + \sum_{gs \in \phi_{\text{GS}}^{\alpha}(m)} G_{\text{gs},t} + \sum_{gs \in \phi_{\text{P2G}}^{\alpha}(m)} G_{v,t} = \sum_{n \in \phi_{\text{GN}}^{\alpha}(m)} f_{nm,t}^{\text{out}} + \sum_{ss \in \phi_{\text{SS}}^{\alpha}(m)} [GS_{\text{ch},t} - GS_{\text{disch},t}] + GD_{m,t} \quad (15)$$

$$GD_{m,t} = CGD_{m,t} + \sum_{i \in \phi_{NGU}^{(m)}} G_{i,t} \quad (16)$$

$$Q_{ss,t} = Q_{ss,t-\Delta t} + [GS_{ch,t} - GS_{disch,t}] \Delta t \quad (17)$$

$$G_{gs}^{\min} \leq G_{gs,t} \leq G_{gs}^{\max} \quad (18)$$

$$f_{mn}^{\min} \leq f_{mn,t}^{\text{in/out}} \leq f_{mn}^{\max} \quad (19)$$

$$\pi_m^{\min} \leq \pi_{m,t} \leq \pi_m^{\max} \quad (20)$$

$$0 \leq GS_{ch,t} \leq G_{ch,t}^{\max} \quad (21)$$

$$0 \leq GS_{disch,t} \leq G_{disch,t}^{\max} \quad (22)$$

$$Q_{ss}^{\min} \leq Q_{ss,t} \leq Q_{ss}^{\max} \quad (23)$$

式中： s_{mn} 、 d_{mn} 和 L_{mn} 分别为气体管道的横截面积、直径和长度； ω_{mn} 为天然气管道中天然气流动速度； $f_{mn,t}^{\text{out}}$ 和 $f_{mn,t}^{\text{in}}$ 分别为天然气在管道 mn 出口和入口的流量大小； $\pi_{m,t}$ 为 t 时刻气体节点 m 的压力； Ω_{avg} 、 R_g 和 ε_{avg} 分别为天然气管道的平均压缩系数、气体常数和平均环境温度； $Q_{ss,t}$ 和 $GD_{m,t}$ 分别为天然气 t 时刻在储气系统中的储存量和气网节点 m 在 t 时刻的用气需求量。约束(13)为牛顿第二定律的温德罗夫微分近似；约束(14)为天然气管道质量守恒的温德罗夫微分近似；约束(15)描述了所有天然气节点的流量平衡；约束(16)为 t 时刻天然气节点 m 负荷量等于常规非电用气负荷与气转电装置用气之和。约束(17)为储气系统状态约束；约束条件(18)–(23)分别为对天然气源输出约束、天然气管道潮流约束、天然气管道压力约束以及储气系统充放功率和容量的约束。

2.3 综合能源微网内电力与天然气耦合部分建模

综合能源微网中二类系统主要通过电转气装置(P2G)和气转电装置(NGU)实现电能和气能的相互转换^[22-23]。为了实现综合能源微网内二类系统的协同运行，本节将详细介绍MGO在同一区域内的分散协调运行方法。图2为综合能源微网内信息共享模型。

图2中，微网1调度中心通过与其他微网调度中心共享信息，控制本区域内的P2G和MT进行电能与气能的相互转化，以实现完全分散化的协同运行。因此，本文设定两组变量 \mathbf{O} 和 $\mathbf{\Gamma}$ 对共享信息进行建模，其中： \mathbf{O} 为目标变量，作为表示微网独立系统优化时的共享信息向量； $\mathbf{\Gamma}$ 为响应变量，表示协同运行时提供的共享信息向量。当满足一致性约束时，各微网进行协同运行。

$$\mathbf{O} - \mathbf{\Gamma} = 0 \quad (24)$$

因此，当不满足上述约束时，微网中电力系统

和天然气系统的运行决策是相互独立的。目标函数(1)和(12)分别设定为(25)和(26)，这样电力系统和天然气系统可以分别解决各自的优化运行问题。

$$(SP_{\alpha} - E) \min F_{\alpha} \quad (25)$$

$$(SP_{\alpha} - G) \min K_{\alpha} \quad (26)$$

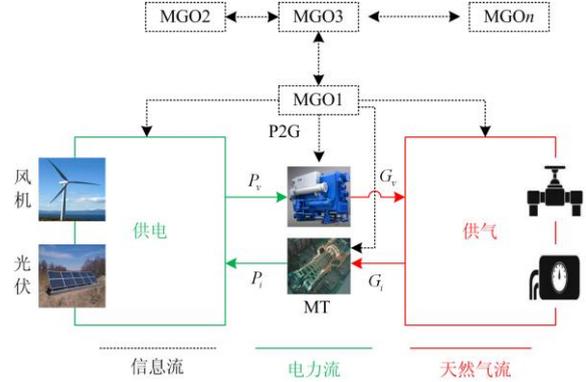


图2 综合能源微网内信息共享模型

Fig. 2 Information sharing model in integrated energy microgrid

2.4 综合能源微网群协调运行建模

综合能源微网之间通过电力连接线和天然气管道实现互联，并形成综合能源微网群。为了保障综合能源微网决策的独立性和信息的保密性，本文采用假定虚拟能源、虚拟负荷和虚拟节点，以松弛微网群的优化问题^[24-28]。图3为综合能源微网群内信息共享模型。

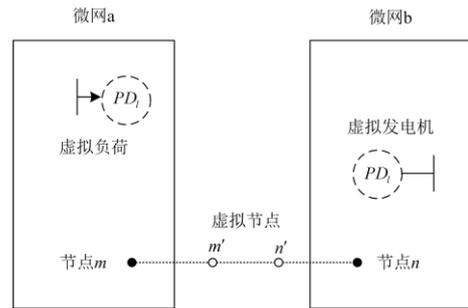


图3 综合能源微网群内信息共享模型

Fig. 3 Information sharing model in integrated energy microgrid clusters

图3中，两个微网的联络线潮流替换为虚拟发电机和虚拟负荷。 PD_i 为从微网a视角下电力联络线共享信息的目标变量，即微网b的负荷需求量，并由微网a在决策中提供；类似， PG_i 为从微网b发出的响应变量，即微网a产生的功率，并由微网b在决策中提供。电力部分的一致性约束如式(27)、式(28)所示，天然气系统气体潮流的建模也采用了类似的方法。

$$(SP_{\alpha}^* - E) \min F_{\alpha}^* \quad (27)$$

$$(SP_{\alpha}^* - G) \min K_{\alpha}^* \quad (28)$$

3 优化模型的求解策略

3.1 优化模型的凸化与转换

由于上述所建立的优化模型中含有机会约束和一致性约束, 故直接求解较为复杂, 且求解速度慢。因此, 需对相关约束进行等价转换。考虑到随机变量 $\varphi(\cdot)$ 是相互独立的, 本文采用文献[22-24]提出的方法, 取随机变量 $\varphi(\cdot)$ 的均值和方差将机会约束转换为线性确定性约束。故约束(2)和(3)可转换为

$$\sum_{i \in \phi_{TU}^{\alpha}} [P_{i,t} + R_{i,t}] + \sum_{w \in \phi_{WT}^{\alpha}} E(P_{w,t}) + \sum_{s \in \phi_{SO}^{\alpha}} E(P_{s,t}) \geq \sum_{v \in \phi_{PG}^{\alpha}} P_{v,t} + \sum_{d \in \phi_{MG}^{\alpha}} E(PD_{d,t}) + Z_{\xi_i} \cdot \Theta \quad (29)$$

$$\Theta = \sqrt{\sum_{w \in \phi_{WT}^{\alpha}} \sigma_{w,t}^2 + \sum_{s \in \phi_{SO}^{\alpha}} \sigma_{s,t}^2 + \sum_{b \in \phi_{BUS}^{\alpha}} \sigma_{b,t}^2}$$

$$\left| \begin{aligned} & \sum_{i \in \phi_{TU}^{\alpha}} SF_{l,i} P_{i,t} + \sum_{w \in \phi_{WT}^{\alpha}} SF_{l,w} E(P_{w,t}) + \\ & \sum_{s \in \phi_{SO}^{\alpha}} SF_{l,s} E(P_{s,t}) - \sum_{d \in \phi_{MG}^{\alpha}} SF_{l,b} E(PD_{d,t}) - \\ & \sum_{d \in \phi_{MG}^{\alpha}} SF_{l,b} E(PD_{d,t}) + Z_{\xi_i} \cdot \Theta \end{aligned} \right| \leq PL_l^{\max} \quad (30)$$

$$\Theta = \sqrt{\sum_{w \in \phi_{WT}^{\alpha}} \sigma_{w,t}^2 + \sum_{s \in \phi_{SO}^{\alpha}} \sigma_{s,t}^2 + \sum_{b \in \phi_{BUS}^{\alpha}} \sigma_{b,t}^2}$$

经过上述变换后, 可将综合能源微网电力部分模型转换为一个凸二次规划问题, 该类问题的求解方法已较为成熟。此外, 对于一致性约束(25)–(28), 本文通过在目标函数增加一个拉格朗日惩罚项松弛一致性约束, 以表示共享信息对目标函数值的影响[25]。具体变换如式(31)–式(34)所示。

$$F_{\alpha}(\zeta_e^{\alpha}, \lambda^{\alpha}, \rho^{\alpha}) = C_{gen}^{MG_{\alpha}^g} + \sum_{t \in T} [\lambda_{v,t}^{\alpha} \cdot (P_{v,t}^* - P_{v,t}) + \|\rho_{v,t}^{\alpha} \kappa(P_{v,t}^* - P_{v,t})\|_2^2] + \sum_{t \in T} [\lambda_{i,t}^{\alpha} \cdot (P_{i,t}^* - P_{i,t}) + \|\rho_{i,t}^{\alpha} \kappa(P_{i,t}^* - P_{i,t})\|_2^2] \quad (31)$$

$$K_{\alpha}(\zeta_g^{\alpha}, \lambda^{\alpha}, \rho^{\alpha}) = C_{gas}^{MG_{\alpha}^g} + C_{GSS}^{MG_{\alpha}^g} + \sum_{t \in T} [\lambda_{v,t}^{\alpha} \cdot (G_{v,t}^* - G_{v,t}) + \|\rho_{v,t}^{\alpha} \kappa(G_{v,t}^* - G_{v,t})\|_2^2] + \sum_{t \in T} [\lambda_{i,t}^{\alpha} \cdot (G_{i,t}^* - G_{i,t}) + \|\rho_{i,t}^{\alpha} \kappa(G_{i,t}^* - G_{i,t})\|_2^2] \quad (32)$$

$$F_{\alpha}'(\zeta_e^{\alpha'}, \lambda^{\alpha'}, \rho^{\alpha'}) = C_{gen}^{MG_{\alpha}^g} + \sum_{t \in T} [\lambda_{i,t}^{\alpha'} \cdot (PD_{i,t} - PD_{i,t}^*) + \|\rho_{i,t}^{\alpha'} \kappa(PD_{i,t} - PD_{i,t}^*)\|_2^2] \quad (33)$$

$$K_{\alpha}'(\zeta_g^{\alpha'}, \lambda^{\alpha'}, \rho^{\alpha'}) = C_{gas}^{MG_{\alpha}^g} + C_{GSS}^{MG_{\alpha}^g} + \sum_{t \in T} [\lambda_{mm',t}^{\alpha'} \cdot (f_{mm',t}^{out} - f_{mm',t}^{in*}) + \|\rho_{mm',t}^{\alpha'} \kappa(f_{mm',t}^{out} - f_{mm',t}^{in*})\|_2^2] + \sum_{t \in T} [\lambda_{m,t}^{\alpha'} \cdot (\pi_{i,t} - \pi_{i,t}^*) + \|\rho_{m,t}^{\alpha'} \kappa(\pi_{i,t} - \pi_{i,t}^*)\|_2^2] \quad (34)$$

式中: ζ_e^{α} 和 ζ_g^{α} 分别为综合能源微网 α 电力部分和天然气部分的优化变量向量; λ^{α} 和 ρ^{α} 分别为电力部分和天然气部分共享运行信息不一致时的拉格朗日惩罚乘数向量; $(\cdot)^*$ 为协调运行产生的共享变量, 其他变量则在子问题中进行优化; $\lambda^{\alpha'}$ 和 $\rho^{\alpha'}$ 分别为综合能源微网群协调运行的拉格朗日惩罚乘数的更新向量[29]。

3.2 凸化后模型的求解

原始模型经过上述凸化和转换后, 本文采用分层迭代方法对模型进行求解, 具体算法流程图如图4所示。

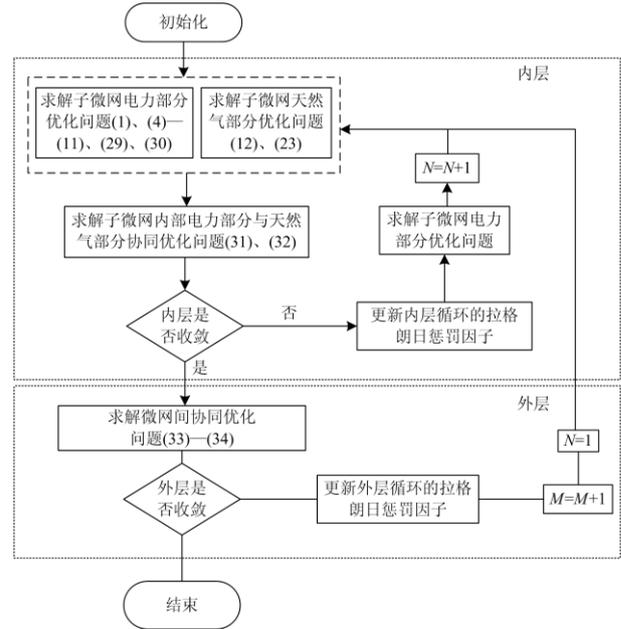


图4 分层迭代算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the hierarchical iterative algorithm

图4中, N 和 M 分别为内层和外层的迭代次数; 内层更新共享变量 $(\cdot)^N$ 时, 本文考虑了不同能源间的转换效率, 如式(35)、式(36)所示。

$$P_{v,t}^{*N} = G_{v,t}^{*N} / \eta_{P2G} \quad (35)$$

$$P_{i,t}^{*N} = G_{i,t}^{*N} \cdot \eta_{MT} \quad (36)$$

式中, η_{P2G} 和 η_{MT} 分别为电转气和气转电的效率。内层和外层收敛的判别式为

$$|O_t^{In/OutM} - \Gamma_t^{In/OutM}| \leq \varepsilon \quad (37)$$

$$\left| \frac{f_s^{N/M} - f_s^{N-1/M-1}}{f_s^{N/M}} \right| \leq \omega \quad (38)$$

式中, ε 和 ω 均为收敛阈值。

此外, 内层循环和外层循环的拉格朗日惩罚因子更新公式为

$$\lambda_t^{\alpha(N+1)} = \lambda_t^{\alpha(N)} + 2(\rho_t^{\alpha(N)})^2 (O_t^{\text{In}N} - \Gamma_t^{\text{In}N}) \quad (39)$$

$$\rho_t^{\alpha(N+1)} = k \cdot \rho_t^{\alpha(N)} \quad (40)$$

$$\lambda_t^{\alpha(M+1)} = \lambda_t^{\alpha(M)} + 2(\rho_t^{\alpha(M)})^2 (O_t^{\text{Out}M} - \Gamma_t^{\text{Out}M}) \quad (41)$$

$$\rho_t^{\alpha(M+1)} = a \cdot \rho_t^{\alpha(M)} \quad (42)$$

式中, k 和 a 分别为更新系数。

4 算例分析

4.1 测试系统参数

为了验证所提方法的优越性, 本文选取的算例系统为 2 个互联的综合能源微网 IEMG, 每个微网均包含 6 个电力节点和 6 个天然气节点。图 5 为 2 个互联综合能源微网的拓扑结构图。求解平台为 Matlab/R2016a, 并调用成熟高效的 Gurobi 商业求解器。

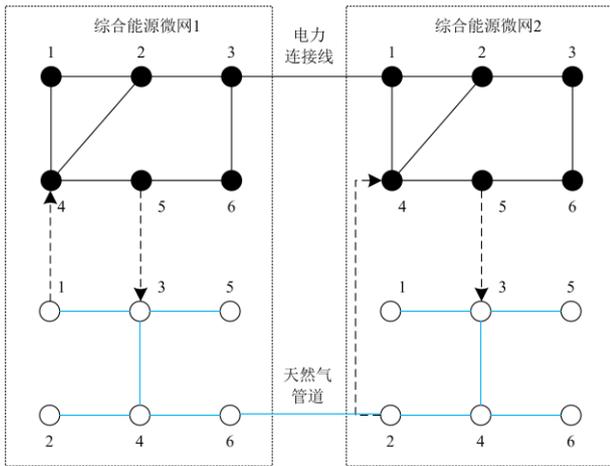


图 5 二个互联综合能源微网的拓扑结构图

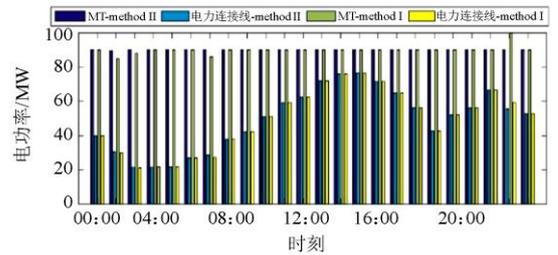
Fig. 5 Topology of the two integrated energy MGs

由图 5 可知, 黑色连线和黑色圆球分别表示电力线路和电力节点; 蓝色连线和黑色空心圆球分别表示天然气管道和天然气节点。综合能源微网间通过电力连接线(IEMG1-电节点 3 和 IEMG2-电节点 1)和天然气管道相连(IEMG1-气节点 6 和 IEMG2-气节点 2); IEMG1-电节点 4 和 IEMG2-电节点 4 均安装了气转电装置; IEMG1-电节点 5 和 IEMG2-电节点 5 均安装了气转电装置; IEMG1-电节点 2 和 IEMG2-电节点 6 均安装了风机; IEMG1-电节点 6 和 IEMG2-电节点 2 均安装了光伏; IEMG1-气节点

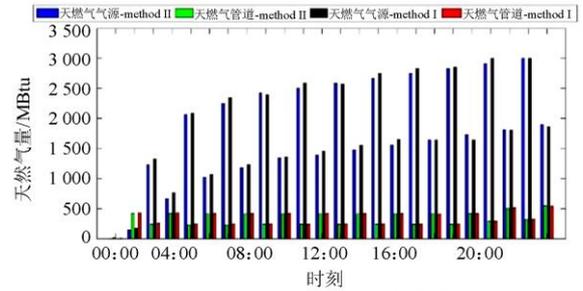
5 和 IEMG2-气节点 1 均安装了气源。此外, 二个微网的电节点 4 均安装气储能。 σ_d 、 σ_w 和 σ_s 分别为电力负荷、风能和太阳能预测误差分布函数的标准差; ξ_t 和 ψ_t 分别为 0.05 和 0.1。 k 和 a 均为 1.25。 罚乘子的初值为 1, 收敛阈值均为 0.001。

4.2 优化结果分析

本文将从系统运行成本、计算时间和算法收敛性等方面对两种方法进行比较分析, 验证所提方案的优越性。方法一为集中优化法; 方法二为本文所提方法。图 6 为 24 h 两种方法的典型设备的调度结果图。



(a) 微型燃气轮机和电力连接线



(b) 天然气气源和天然气管道

图 6 24 h 两种方法的典型设备的调度结果图

Fig. 6 Scheduling results of a typical device under two methods in 24 hours

比较图 6 可知, 在一个调度周期内, 方法二下 MT 的总发电量为 2 161.5 MW, 天然气气源的总供气量为 43 035.0 MBtu; 方法一下 MT 的总发电量为 2 162.1 MW, 天然气气源的总供气量为 44 198.1 MBtu。此外, 方法一下从综合能源微网 1 流向综合能源微网 2 的电功率为 1 189.8 MW, 天然气量为 8 131.5 MBtu, 而方法二下电功率为 1 186.3 MW, 天然气量为 8 000 MBtu。另外, 方法二下 2 个微网的运行成本为 407.1 万元(其中, 电力部分为 55.6 万元, 天然气部分为 351.5 万元); 方法一下系统运行成本为 407.4 万元(其中, 电力部分为 55.7 万元, 天然气部分为 351.7 万元)。由此可表明, 本文所提方法的系统运行成本低于方法一 0.7%。故本文所提方法优于方法二。图 7 为分层迭代算法的收敛情况。

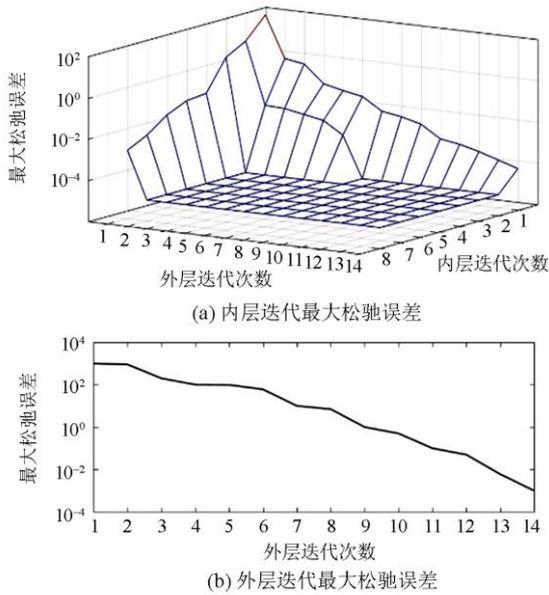


图 7 分层迭代算法的收敛情况

Fig. 7 Convergence of the hierarchical iterative process

由图 7 可知, 本文所提方法在外层循环中迭代 14 次收敛, 而内层循环次数从 8 次逐步减少到 1 次。此外, 该方法的计算时间为 67.7 s。

为了分析可靠性约束对系统运行成本的影响, 本文比较分析了不同失负荷概率下两种方法的运行成本和计算时间。实际工程经验表明, 失负荷概率值越高, 安全需求越低, 系统安全水平降低, 运行成本降低。由此可见, 最优运行策略应该是在经济性和可靠性之间进行权衡。图 8 为不同失负荷概率的系统运行成本和模型计算时间。

由图 8 可知, 两种方法的运行成本差异很小。尽管计算时间上差异性较大, 但在实际微电网群系统日前优化运行时, 本文所提方法的计算时间是可以接受的。这是因为, 随着微网群系统规模逐渐增长, 由于需要电力系统和天然气系统的相关数据,

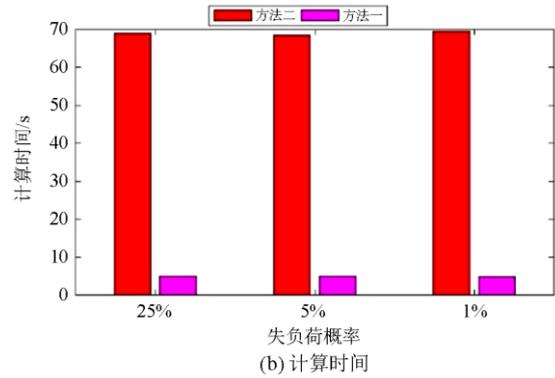
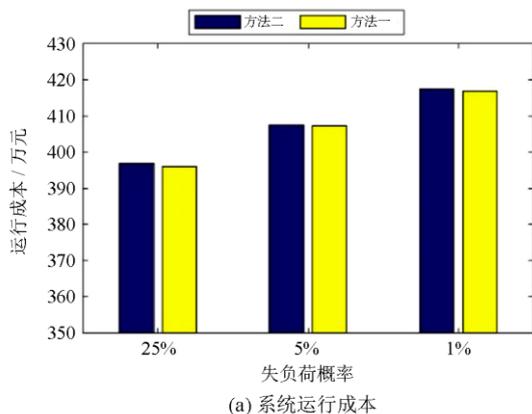


图 8 不同失负荷概率的系统运行成本和模型计算时间比较图

Fig. 8 Operating cost and computation time for different ξ_r

而两种类型系统通常对应不同的市场法规或行政辖区, 因此, 在系统容量配置时将更为复杂。

图 9 为不同随机变量方差值下方法二的运行成本变化情况图。随机变量方差值是指风能和太阳能发电预测数据的不同精度水平。

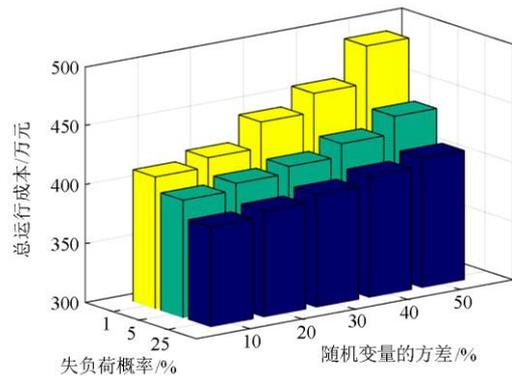


图 9 不同失负荷概率和标准差的总运行成本
Fig. 9 Total operating cost for different ξ_r and standard deviations

由图 9 可知, 总运行成本随着随机变量的方差值降低而降低, 说明预测越准确, 运行成本越低。此外, 在失负荷概率较低情况时, 系统运行成本差异性更为明显, 说明安全性要求较高的综合能源微网群系统对可再生能源预测误差更敏感。

5 结论

综合能源微网群因其在提高能源利用效率和促进可再生能源生产扩散方面的固有优势而备受关注^[30-31]。本文提出了一种适用于综合能源微网群的随机优化运行方法, 即每个微网作为独立的决策者相互协作, 共享有限的信息集。为了解决风电和太

太阳能发电的不确定性和负荷预测误差对系统安全性的影响, 本文采用机会约束规划的方法, 有效抑制不确定性的影响。考虑到所提优化模型直接求解较为困难, 本文采用分层迭代算法对凸化变换后的优化模型进行求解, 保障了解的全局最优性和快速性。最后, 通过仿真算例, 结果表明该方法在保持系统调度者个体决策独立性和信息私密性的前提下, 能有效地解决综合能源微网群的协同运行问题。

参考文献

- [1] 汪洋子, 陈茜. 计及冷、热、电联产的气电互联网络最优调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 168-175. WANG Yangzi, CHEN Qian. Optimal dispatch for the integrated electrical and natural gas network with combined cooling, heat and power plant[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 168-175.
- [2] 周强, 马彦宏, 沈琛云, 等. 新时期中国西北地区新能源可持续发展反思与建议[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 78-84. ZHOU Qiang, MA Yanhong, SHEN Chenyun, et al. Reflection and suggestions on sustainable development of new energy in Northwest China in New Era[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 78-84.
- [3] 刘广, 白晓清, 刁天一. 考虑气电网架构的沼-风-光综合能源微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 49-58. LIU Guang, BAI Xiaqing, DIAO Tianyi. Optimal scheduling of biogas-wind-solar integrated energy microgrid system considering gas-power network architecture[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 49-58.
- [4] 刘德旭, 刘艳, 潘永旗, 等. 基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 64-71. LIU Dexu, LIU Yan, PAN Yongqi, et al. Research on Power balance model based on priority consumption of renewable energy power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 64-71.
- [5] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电联供微网多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 43-51. LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi-objective planning for combined heat and power microgrid considering demand side cooperative response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 43-51.
- [6] 沈海平, 陈铭, 钱磊, 等. 计及电转气耦合的电-气互联系统机组组合线性模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 34-41. SHEN Haiping, CHEN Ming, QIAN Lei, et al. Linear model research of unit commitment for integrated electricity and natural-gas systems considering power-to-gas coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 34-41.
- [7] 肖冰, 吴晓丹, 尹宏学, 等. 蒙东地区适应新能源消纳的储能系统配置效果分析[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 13-20. XIAO Bing, WU Xiaodan, YIN Hongxue, et al. Configuration effect of energy storage system in Mengdong grid for new energy consumption[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 13-20.
- [8] 文乐, 张宝锋, 张恩享, 等. 并网型多能互补系统优化规划方法[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 68-72. WEN Le, ZHANG Baofeng, ZHANG Enxiang, et al. Optimized planning method for grid-connected multi-energy complementary system[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 68-72.
- [9] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG X, et al. Stochastic security-constrained scheduling of coordinated electricity and natural gas infrastructures[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 11(3): 1674-1683.
- [10] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [11] HE Y, YAN M, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [12] WANG Q, GUAN Y, WANG J. A chance-constrained two-stage stochastic program for unit commitment with uncertain wind power output[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 27(1): 206-215.
- [13] ODETAYO B, KAZEMI M, MACCORMACK J, et al. A chance constrained programming approach to the integrated planning of electric power generation, natural gas network and storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6883-6893.
- [14] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8. XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [15] BO R, LI F. Impact of load forecast uncertainty on LMP[C] // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA: 1-6.

- [16] California ISO. Integration of renewable resources: technical appendices for California ISO renewable integration studies version 1[EB/OL]. <http://www.caiso.com/282d/282d85c9391b0.pdf>.
- [17] KARGARIAN A, FU Y, WU H. Chance-constrained system of systems based operation of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3404-3413.
- [18] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2011, 21(2).
- [19] FANG J, ZENG Q, AI X, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 188-198.
- [20] YANG J, ZHANG N, KANG C, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2087-2097.
- [21] YAN M, HE Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4881-4892.
- [22] NIKMEHR N, NAJAFI RAVADANEGH S. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [23] LU T, AI Q, WANG Z. Interactive game vector: a stochastic operation-based pricing mechanism for smart energy systems with coupled-microgrids[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1462-1475.
- [24] JIANG Ruiwei, ZHANG Muhong, LI Guang, et al. Benders decomposition for the two-stage security constrained robust unit commitment problem[C] // 62nd IIE Annual Conference and Expo, 2018, Orlando, FL, USA.
- [25] WU H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, et al. Chance-constrained day-ahead scheduling in stochastic power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1583-1591.
- [26] TOSSERAMS S, ETMAN L F P, PAPALAMBROS P Y, et al. An augmented Lagrangian relaxation for analytical target cascading using the alternating directions method of multipliers[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 31(3): 176-189.
- [27] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [28] 史林军, 史江峰, 杨启航, 等. 基于分时电价的家庭智能用电设备的优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 88-95.
SHI Linjun, SHI Jiangfeng, YANG Qihang, et al. Optimal scheduling of intelligent household electrical appliances based on time-of-use power price[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 88-95.
- [29] 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.
WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering heat storage characteristics of heating network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 45-52.
- [30] 张利军, 王一铮, 陈飞, 等. 计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 3-13.
ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [31] 白宏坤, 尹硕, 李虎军, 等. 计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 11-19.
BAI Hongkun, YIN Shuo, LI Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 11-19.

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-12-05

作者简介:

苏磊(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为设备状态监测及评价技术、电力系统直流偏磁。E-mail: 603933500@qq.com

(编辑 葛艳娜)