

计及多能源集线器的电热综合能源系统分布式优化

程恩林¹, 卫志农¹, 嵇文路², 叶婷², 陈胜¹, 周亦洲¹, 孙国强¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司, 江苏 南京 210019)

摘要:由于电热综合能源系统各主体信息不共享、存在隐私保护等,区域内不同主体的自治决策和通信安全变得至关重要。为此,提出一种基于交替方向乘子法(ADMM)的电热综合能源分布式优化方法,以实现电热综合能源系统中能源集线器(EH)的自治决策和分布式优化。建立了电热综合能源系统与EH的优化调度模型,并建立了基于ADMM的电热综合能源系统分布式优化模型,实现了综合能源系统运营商与多个EH运营商的分布式功率交互。同时,采用自适应步长的方法求解所建立的模型,提高了算法的收敛性。

关键词:电热综合能源系统;能源集线器;分布式优化;交替方向乘子法;功率交互

中图分类号:TK 01;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108020

0 引言

随着能源需求的不断增长和环境问题的日益突出,综合能源系统成为新的发展方向。综合能源系统可以打破不同能源系统之间独立运行的局面,实现多能源系统的集成^[1-2],目前电热综合能源系统发展非常迅速^[3]。电热综合能源系统中能源集线器EH(Energy Hub)作为耦合电网和热网的关键组成部分,承担着能源生产、存储、转化、分配的重要作用^[4],由于各主体信息不共享、存在隐私保护等,实现计及多EH的电热综合能源系统分布式优化调度有着重要意义。

目前国内外学者已对电热综合能源系统的综合建模和优化运行进行了大量的研究工作,这些工作大多侧重于集中式的优化方法。文献[5]将电锅炉作为电转热设备,对电热综合能源系统进行概率潮流分析。文献[6]建立了热网模型,并且对多区域冷热电联供系统的容量进行协同优化配置。文献[7-8]考虑风电消纳问题,提出了电热综合能源系统源荷优化调度方法。文献[9]建立了EH模型,考虑利益驱动下的EH参与电力市场和热力市场的行为。文献[10]建立了计及热网储热、衰减、延时特性的电热联合系统调度模型。传统的集中式优化中,含多EH的电热综合能源系统中的信息采集以及电、气、热的调度,依赖于统一的调度控制中心,存在通信量大、模型复杂以及信息隐私等问题,难以满足电热综合能源系统的运行需求^[11]。考虑到EH作为与配电网、热网耦合的重要主体,采用分布式优化方

法可以很好地解决计及多EH的电热综合能源系统优化调度问题。

交替方向乘子法ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers)相比于辅助问题原则、拉格朗日松弛等分布式算法,具有形式简单、收敛性好的特点,在含多个主体的分布式优化问题中获得了广泛应用。文献[12]建立了包含配电网运行约束的多微网直接交易模型,并采用ADMM进行求解。文献[13]将交直流混合配电网进行分区,并进行分布式鲁棒优化。然而电热综合能源系统在能源类型和网络结构上与微电网和交直流配电网存在较大区别,其不仅要考虑电网特性,还要考虑热网以及EH特性。在综合能源系统分布式优化中,文献[14]通过求解多区域综合能源系统子问题,以实现各区域间协同优化。文献[15]将电网、热网、气网进行分区,采用高斯回代的ADMM进行分布式优化。文献[14-15]实现了电网、气网和热网之间的分布式优化,但是并未将EH作为独立的主体,同时对可再生能源的随机性也没有进行处理。文献[16]提出了考虑碳排放的多EH运营商的经济调度模型,该模型实现了多EH运营商的分布式优化;文献[17]对多工厂型综合能源系统进行分布式优化,实现了能量梯级利用,但文献[16-17]未考虑综合能源系统与多能源用户之间的分布式功率交互。此外,综合能源系统分布式优化中采用的ADMM及其改进算法的收敛性能大多依赖于参数的选择,自适应性较差。因此,在计及多EH的电热综合能源分布式优化中有必要采用收敛性更加稳定的ADMM。

本文针对计及多EH的电热综合能源系统,将集中式优化问题分解成独立子问题进行求解。首先,建立了电热综合能源系统与EH优化调度模型。然后,考虑将配电网和热网共同组成综合能源系统运营商,建立了基于ADMM的电热综合能源系统分布式优化模型,将各个EH作为独立的决策主体、电

收稿日期:2021-01-29;修回日期:2021-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877071);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020090)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877071) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.(J2020090)

热综合能源系统作为另一决策主体,实现了综合能源系统与各个EH之间的分布式最优调度;同时,采用自适应步长的方法求解所建立的模型,提高了算法的收敛性。最后,通过仿真算例验证了分布式算法和集中式算法的一致性,分析了分布式算法的收敛性以及EH与配电网和热网的功率交互。

1 电热综合能源系统与EH优化调度模型

1.1 配电网模型

配电网通常为径向拓扑结构,本文采用线性DistFlow潮流方程^[18]建立配电网的模型。式(1)~(3)分别为配电网中有功功率平衡、无功功率平衡以及节点电压平衡方程。

$$P_{ij,t}^{\pi} = \sum_{r \in j} P_{jr,t}^{\pi} + P_{MT,j}^{\pi} - P_{L,j}^{\pi} + P_{eth,j}^{\pi} + P_{buy,t}^{\pi} \quad (1)$$

$$Q_{ij,t}^{\pi} = \sum_{r \in j} Q_{jr,t}^{\pi} + Q_{MT,j}^{\pi} - Q_{L,j}^{\pi} + Q_{buy,t}^{\pi} \quad (2)$$

$$U_{i,t}^{\pi} - U_{j,t}^{\pi} = (P_{ij,t}^{\pi} r_{ij} + Q_{ij,t}^{\pi} x_{ij}) / U_{0,t}^{\pi} \quad (3)$$

式中: i, j 和 r 为配电网节点编号; $r \in j$ 表示节点 r 为与节点 j 相连的节点; π 为不同的场景编号; t 为时段; $P_{ij,t}^{\pi}$ 、 $Q_{ij,t}^{\pi}$ 分别为节点 i 到节点 j 的有功传输功率、无功传输功率; $P_{MT,j}^{\pi}$ 、 $P_{L,j}^{\pi}$ 、 $P_{eth,j}^{\pi}$ 和 $P_{buy,t}^{\pi}$ 分别为微型燃气轮机MT(Micro-Turbine)有功出力、负荷有功功率、EH交互功率和从上级电网购买的有功功率; $Q_{MT,j}^{\pi}$ 、 $Q_{L,j}^{\pi}$ 和 $Q_{buy,t}^{\pi}$ 分别为MT无功出力、负荷无功功率和从上级电网购买的无功功率; $U_{i,t}^{\pi}$ 、 $U_{0,t}^{\pi}$ 分别为节点电压、基准电压; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为线路 ij 的电阻、电抗。

同时,配电网还应满足购电约束、电压约束和线路功率约束,分别如式(4)~(6)所示。

$$P_{buy}^{\min} \leq P_{buy,t}^{\pi} \leq P_{buy}^{\max} \quad (4)$$

$$U^{\min} \leq U_{i,t}^{\pi} \leq U^{\max} \quad (5)$$

$$P_{ij}^{\min} \leq P_{ij,t}^{\pi} \leq P_{ij}^{\max} \quad (6)$$

式中: P_{buy}^{\max} 、 P_{buy}^{\min} 分别为购电功率上、下限; U^{\max} 、 U^{\min} 分别为节点电压上、下限; P_{ij}^{\max} 、 P_{ij}^{\min} 分别为线路 ij 传输功率上、下限。

MT要满足有功出力约束、无功出力约束和爬坡约束,分别如式(7)~(9)所示。

$$P_{MT}^{\min} \leq P_{MT,j}^{\pi} \leq P_{MT}^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{MT}^{\min} \leq Q_{MT,j}^{\pi} \leq Q_{MT}^{\max} \quad (8)$$

$$-P_{MT}^{\text{ramp}} \leq P_{MT,j}^{\pi} - P_{MT,j}^{\pi-1} \leq P_{MT}^{\text{ramp}} \quad (9)$$

式中: P_{MT}^{\max} 、 P_{MT}^{\min} 分别为MT有功出力上、下限; Q_{MT}^{\max} 、 Q_{MT}^{\min} 分别为MT无功出力上、下限; P_{MT}^{ramp} 为MT最大爬坡功率。

1.2 热网模型

传统的热网模型为非线性非凸模型,难以求得最优解。本文采用恒流变温的质调节模型来描述热网^[19],包括管道损耗方程(式(10))、节点流量平衡方

程(式(11))、节点功率平衡方程(式(12))、节点温度方程(式(13))、用户功率方程(式(14))和热源功率方程(式(15))。

$$T_{ed,n,t}^{\pi} = (T_{st,m,t}^{\pi} - T_{a,t}^{\pi}) e^{-\frac{L_{mn}}{Rc\rho_w f_{mn}}} + T_{a,t}^{\pi} \quad (10)$$

$$\sum_{m \in n} f_{mn} = \sum_{p \in n} f_{np} \quad (11)$$

$$\sum_{m \in n} T_{ed,n,t}^{\pi} f_{mn} = T_{st,n,t}^{\pi} \sum_{p \in n} f_{np} \quad (12)$$

$$T_{st,n,t}^{\pi} = T_{n,t}^{\pi} \quad (13)$$

$$H_{l,t}^{\pi} = c\rho_w \eta f_l (T_{LS,t}^{\pi} - T_{LR,t}^{\pi}) \quad (14)$$

$$H_{s,t}^{\pi} = c\rho_w \eta f_s (T_{HS,t}^{\pi} - T_{HR,t}^{\pi}) \quad (15)$$

式中: m, n 和 p 为热网节点编号; l 和 s 分别为负荷和热源编号; $T_{ed,n,t}^{\pi}$ 、 $T_{st,m,t}^{\pi}$ 和 $T_{a,t}^{\pi}$ 分别为管道 mn 末端温度、管道 mn 始端温度和环境温度; $T_{n,t}^{\pi}$ 为节点温度; f_{mn} 、 f_l 和 f_s 分别为管道 mn 的流量、负荷处的管道流量和热源处的管道流量; R 为管道单位热阻; c 为水的比热容; ρ_w 为水的密度; L_{mn} 为管道 mn 长度; η 为换热装置的效率; $H_{l,t}^{\pi}$ 、 $H_{s,t}^{\pi}$ 分别为负荷功率、热源功率; $T_{LS,t}^{\pi}$ 、 $T_{LR,t}^{\pi}$ 分别为负荷供水温度、负荷回水温度; $T_{HS,t}^{\pi}$ 、 $T_{HR,t}^{\pi}$ 分别为热源供水温度、热源回水温度。

热网在运行过程中,要满足节点温度约束(式(16))、负荷温度约束(式(17))和热源温度约束(式(18))。

$$T_{n,t}^{\min} \leq T_{n,t}^{\pi} \leq T_{n,t}^{\max} \quad (16)$$

$$T_{LS,t}^{\min} \leq T_{LS,t}^{\pi} \leq T_{LS,t}^{\max} \quad (17)$$

$$T_{HS,t}^{\min} \leq T_{HS,t}^{\pi} \leq T_{HS,t}^{\max} \quad (18)$$

式中: $T_{n,t}^{\max}$ 、 $T_{n,t}^{\min}$ 分别为节点温度上、下限; $T_{LS,t}^{\max}$ 、 $T_{LS,t}^{\min}$ 分别为负荷供水温度上、下限; $T_{HS,t}^{\max}$ 、 $T_{HS,t}^{\min}$ 分别为热源供水温度上、下限。

1.3 EH模型

EH是一个具有多输入和多输出的耦合组件,通过能量转换和储能设备将电、热、气等能源进行耦合。电热综合能源系统可以通过EH将配电网和热网进行连接。本文使用的EH结构如图1所示,由可再生资源、热电联产CHP(Combined Heat and Power)机组、电锅炉、电储能和热储能组成。输入端为电功率和气功率,输出端为电功率和热功率。

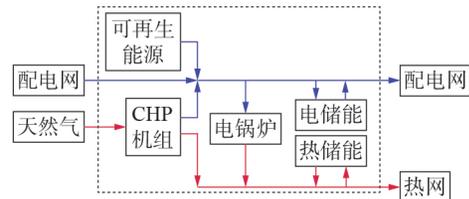


图1 EH结构图

Fig.1 Structure diagram of EH

1.3.1 CHP模型

CHP机组消耗天然气产生电能、消耗天然气产

生热能、消耗气功率约束,分别如式(19)–(21)所示。

$$P_{\text{chp},e,v}^{i,\pi} = \eta_{\text{chp},e,v} Q_{\text{gas},v}^{i,\pi} \quad (19)$$

$$H_{\text{chp},h,v}^{i,\pi} = \eta_{\text{chp},h,v} Q_{\text{gas},v}^{i,\pi} \quad (20)$$

$$Q_{\text{gas},v}^{\min} \leq Q_{\text{gas},v}^{i,\pi} \leq Q_{\text{gas},v}^{\max} \quad (21)$$

式中: v 为EH编号; $Q_{\text{gas},v}^{i,\pi}$ 为CHP机组消耗的气功率; $\eta_{\text{chp},e,v}$ 、 $\eta_{\text{chp},h,v}$ 分别为消耗气功率转化为电、热功率的效率; $P_{\text{chp},e,v}^{i,\pi}$ 、 $H_{\text{chp},h,v}^{i,\pi}$ 分别为CHP机组产生的电、热功率; $Q_{\text{gas},v}^{\max}$ 、 $Q_{\text{gas},v}^{\min}$ 分别为消耗气功率上、下限。

1.3.2 电锅炉模型

电锅炉的电热转换关系、消耗电功率约束分别如式(22)、(23)所示。

$$H_{\text{eb},v}^{i,\pi} = \eta_{\text{eb},v} P_{\text{eb},v}^{i,\pi} \quad (22)$$

$$P_{\text{eb},v}^{\min} \leq P_{\text{eb},v}^{i,\pi} \leq P_{\text{eb},v}^{\max} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{eb},v}^{i,\pi}$ 为电锅炉消耗的电功率; $\eta_{\text{eb},v}$ 为电锅炉的电热转换效率; $H_{\text{eb},v}^{i,\pi}$ 为电锅炉产生的热功率; $P_{\text{eb},v}^{\max}$ 、 $P_{\text{eb},v}^{\min}$ 分别为电锅炉消耗电功率上、下限。

1.3.3 储能模型

储能可以在电价低谷时储存能量,在电价高峰时释放能量,本文考虑的储能包括电储能和热储能。电储能在运行过程中的能量平衡方程、周期容量相等方程、荷电状态SOC(State Of Charge)约束、充电功率约束和放电功率约束,分别如式(24)–(28)所示。

$$E_{v,t}^{\pi} = E_{v,t-1}^{\pi} + (P_{\text{ch},v}^{t-1,\pi} \eta_v^{\text{ch}} - P_{\text{dis},v}^{t-1,\pi} / \eta_v^{\text{dis}}) \Delta t \quad (24)$$

$$E_{v,0}^{\pi} = E_{v,T}^{\pi} \quad (25)$$

$$\delta_{\text{soc},e,v}^{\min} \leq E_{v,t}^{\pi} / E_{v,t}^{\max} \leq \delta_{\text{soc},e,v}^{\max} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{\text{ch},v}^{i,\pi} \leq P_{\text{ch},v}^{\max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{\text{dis},v}^{i,\pi} \leq P_{\text{dis},v}^{\max} \quad (28)$$

式中: $E_{v,t}^{\pi}$ 、 $E_{v,0}^{\pi}$ 和 $E_{v,T}^{\pi}$ 分别为 t 时段、初始时段和周期结束时段 T 的电储能容量; $E_{v,t}^{\max}$ 为最大电储能容量; η_v^{ch} 、 η_v^{dis} 分别为电储能充电、放电效率; $P_{\text{ch},v}^{i,\pi}$ 、 $P_{\text{dis},v}^{i,\pi}$ 分别为电储能充电、放电功率; $\delta_{\text{soc},e,v}^{\max}$ 、 $\delta_{\text{soc},e,v}^{\min}$ 分别为SOC上、下限; $P_{\text{ch},v}^{\max}$ 、 $P_{\text{dis},v}^{\max}$ 分别为电储能充电、放电功率上限。

热储能在运行过程中要满足和电储能同样的约束,本文不再赘述。此外,EH在运行过程中,电功率平衡方程、热功率平衡方程分别如式(29)、(30)所示。

$$P_{\text{PV},v}^{i,\pi} + P_{\text{WT},v}^{i,\pi} + P_{\text{chp},e,v}^{i,\pi} - P_{\text{ch},v}^{i,\pi} + P_{\text{dis},v}^{i,\pi} - P_{\text{eb},v}^{i,\pi} = P_{\text{hte},v}^{i,\pi} \quad (29)$$

$$H_{\text{chp},h,v}^{i,\pi} + H_{\text{eb},v}^{i,\pi} - H_{\text{ch},v}^{i,\pi} + H_{\text{dis},v}^{i,\pi} = H_{\text{hth},v}^{i,\pi} \quad (30)$$

式中: $P_{\text{PV},v}^{i,\pi}$ 、 $P_{\text{WT},v}^{i,\pi}$ 分别为EH中光伏、风电功率; $P_{\text{ch},v}^{i,\pi}$ 、 $H_{\text{hth},v}^{i,\pi}$ 分别为EH与配电网、EH与热网交互功率; $H_{\text{ch},v}^{i,\pi}$ 、 $H_{\text{dis},v}^{i,\pi}$ 分别为热储能的充热、放热功率。

1.4 电热综合能源系统集中式优化模型

本节建立电热综合能源系统与EH集中式优化模型,以最小化系统运行成本为目标,包括购电成本、MT发电成本、燃气成本、CHP运行成本、电锅炉运行成本以及储能运行成本,如式(31)所示。

$$C = \sum_t \sum_{\pi} \beta^{\pi} (C_{\text{buy},t}^{\pi} P_{\text{buy},t}^{\pi} + C_{\text{MT},t}^{\pi} P_{\text{MT},t}^{\pi}) + \sum_t \sum_{\pi} \sum_v \beta^{\pi} [C_{\text{gas},t}^{\pi} Q_{\text{gas},v}^{i,\pi} + C_{\text{eb},t}^{\pi} P_{\text{eb},v}^{i,\pi} + C_{\text{EES},t}^{\pi} (P_{\text{ch},v}^{i,\pi} + P_{\text{dis},v}^{i,\pi}) + C_{\text{HES},t}^{\pi} (H_{\text{ch},v}^{i,\pi} + H_{\text{dis},v}^{i,\pi}) + C_{\text{chp},t}^{\pi} P_{\text{chp},e,v}^{i,\pi}] \quad (31)$$

式中: C 为系统运行成本; β^{π} 为不同场景出现的概率; $C_{\text{buy},t}^{\pi}$ 为单位购电成本; $C_{\text{MT},t}^{\pi}$ 为MT单位发电成本; $C_{\text{gas},t}^{\pi}$ 为天然气单位功率成本; $C_{\text{eb},t}^{\pi}$ 为电锅炉单位运行维护成本; $C_{\text{EES},t}^{\pi}$ 、 $C_{\text{HES},t}^{\pi}$ 分别为电储能、热储能单位充放电运行维护成本; $C_{\text{chp},t}^{\pi}$ 为CHP机组产生单位电功率运行维护成本。

2 基于自适应步长 ADMM 的分布式优化模型与求解

2.1 自适应步长 ADMM

ADMM采用分解-协同的形式,通过求解局部子问题的解来找到全局问题的解^[20],具有收敛性好、鲁棒性强的优点。ADMM可以解决如式(32)所示形式的问题。

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{z}) \\ \text{s.t. } \mathbf{Ax} + \mathbf{Bz} = \mathbf{c} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $f(\mathbf{x})$ 、 $g(\mathbf{z})$ 为2个子问题的目标函数; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{c} 为耦合系数矩阵, \mathbf{x} 、 \mathbf{z} 为2个子问题的耦合变量,且 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^m$, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{p \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{p \times m}$, $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^p$ 。

ADMM可以将耦合约束引入目标函数中,得到增广拉格朗日形式,如式(33)所示。

$$L_{\rho}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{z}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{Ax} + \mathbf{Bz} - \mathbf{c}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Ax} + \mathbf{Bz} - \mathbf{c}\|^2 \quad (33)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}^T$ 为对偶变量; ρ 为惩罚因子即步长,且 $\rho > 0$ 。 \mathbf{x} 、 \mathbf{z} 、 $\boldsymbol{\lambda}$ 迭代的分布式更新顺序,分别如式(34)–(36)所示。

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \underset{\mathbf{x}}{\text{argmin}} L_{\rho}(\mathbf{x}, \mathbf{z}^{(k)}, \boldsymbol{\lambda}^{(k)}) \quad (34)$$

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \underset{\mathbf{z}}{\text{argmin}} L_{\rho}(\mathbf{x}^{(k+1)}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}^{(k)}) \quad (35)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^{(k+1)} = \boldsymbol{\lambda}^{(k)} + \rho (\mathbf{Ax}^{(k+1)} + \mathbf{Bz}^{(k+1)} - \mathbf{c}) \quad (36)$$

式中:上标 k 、 $k+1$ 分别表示第 k 、 $k+1$ 次迭代。

ADMM要满足原始残差以及对偶残差的停止条件,具体如式(37)和式(38)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{r}^{(k+1)} = \mathbf{Ax}^{(k+1)} + \mathbf{Bz}^{(k+1)} - \mathbf{c} \\ \mathbf{s}^{(k+1)} = \rho \mathbf{A}^T \mathbf{B} (\mathbf{z}^{(k+1)} - \mathbf{z}^{(k)}) \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} \|\mathbf{r}^{(k+1)}\| \leq \varepsilon^{\text{pri}} \\ \|\mathbf{s}^{(k+1)}\| \leq \varepsilon^{\text{dual}} \end{cases} \quad (38)$$

式中: $\mathbf{r}^{(k+1)}$ 、 $\mathbf{s}^{(k+1)}$ 分别为第 $k+1$ 次迭代时原始残差、对偶残差的值; ε^{pri} 、 $\varepsilon^{\text{dual}}$ 分别为原始残差、对偶残差的容忍上限。

传统ADMM中,步长取值不当会严重影响求解

速度,甚至导致求解过程发散。本文中采用自适应步长 ADMM,通过原始残差和对偶残差的相对关系来自动更新步长。步长更新机制如式(39)所示。

$$\rho^{k+1} = \begin{cases} \tau^{\text{incr}} \rho^k & \|r^{(k)}\| > \mu \|s^{(k)}\| \\ \rho^k / \tau^{\text{decr}} & \|s^{(k)}\| > \mu \|r^{(k)}\| \\ \rho^k & \text{其他} \end{cases} \quad (39)$$

式中: μ 为原始残差和对偶残差之间的比例常数, τ^{incr} 、 τ^{decr} 为步长变化的比例常数,且 $\mu > 1$, $\tau^{\text{incr}} > 1$, $\tau^{\text{decr}} > 1$ 。当原始残差较大时,通过增大步长来调整变量 x 和变量 z 间的关系,加快原始残差收敛;当对偶残差较大时,通过减少步长促进变量 z 的收敛,减小目标函数振荡。

2.2 计及多个EH的电热综合能源系统分布式优化机制

计及多个EH的电热综合能源系统分布式优化框架如图2所示。首先,以系统运行成本最优为目标构建电热综合能源系统和EH优化模型,区域综合能源系统运营商对配电网以及热网进行管理,不同EH运营商对各自的EH进行管理。然后,配电网和EH之间传输耦合电功率和信息,EH与热网之间传输耦合热功率和信息。通过区域综合能源系统运营商和EH运营商的少量信息交互,可以实现不同主体自治决策以及系统总体协同优化。

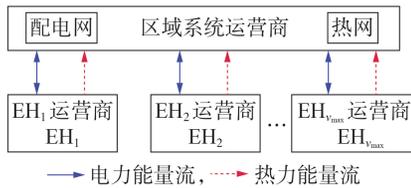


图2 计及多个EH的电热综合能源系统分布式优化框架
Fig.2 Distributed optimization framework of integrated electricity-heat energy system considering multiple EHs

为了实现EH在电热综合能源系统中的分布式优化,需要满足配电网与EH耦合电功率的一致性关系、EH与热网耦合热功率的一致性关系,分别如式(40)和式(41)所示。

$$P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi} = P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi} \quad (40)$$

$$H_{v,t}^{\pi} = H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi} \quad (41)$$

式中: $P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi}$ 、 $H_{v,t}^{\pi}$ 分别为配电网传递给EH的功率、热网中热源所需热功率。

2.3 计及多个EH的电热综合能源系统分布式优化模型

根据式(34)–(37)的求解形式,可以将计及多个EH的电热综合能源系统优化问题分解为综合能源系统子问题以及 v_{max} 个EH子问题。

2.3.1 综合能源系统子问题

建立综合能源系统子问题拉格朗日增广函数,

如式(42)所示。

$$L_{e,h} = \sum_t \sum_{\pi} \rho^{\pi} \left(C_{\text{buy},t}^{\pi} P_{\text{buy},t}^{\pi} + C_{\text{MT},t}^{\pi} P_{\text{MT},t}^{\pi} \right) + \sum_t \sum_{\pi} \left[\lambda_{e,v}^{\iota,\pi,k} \left(P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi} - P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi,k} \right) + \lambda_{h,v}^{\iota,\pi,k} \left(H_{v,t}^{\pi} - H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k} \right) \right] + \sum_t \sum_{\pi} \left[\frac{\rho_v^k}{2} \left(P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi} - P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi,k} \right)^2 + \frac{\rho_v^k}{2} \left(H_{v,t}^{\pi} - H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k} \right)^2 \right] \quad (42)$$

式中: $\lambda_{e,v}^{\iota,\pi,k}$ 、 $\lambda_{h,v}^{\iota,\pi,k}$ 分别为配电网与EH电功率一致性关系的对偶变量、热网与EH热功率一致性关系的对偶变量。同时,需要满足配电网约束式(1)–(9)、热网约束式(10)–(18)。

2.3.2 EH子问题

分别对第 v 个EH子问题建立拉格朗日增广函数,如式(43)所示。

$$L_v = \sum_t \sum_{\pi} \rho^{\pi} \left[C_{\text{eb},t}^{\pi} P_{\text{eb},v}^{\iota,\pi} + C_{\text{EES},t}^{\pi} \left(P_{\text{ch},v}^{\iota,\pi} + P_{\text{dis},v}^{\iota,\pi} \right) \right] + \sum_t \sum_{\pi} \rho^{\pi} \left[C_{\text{gas},t}^{\pi} Q_{\text{gas},v}^{\iota,\pi} + C_{\text{HES},t}^{\pi} \left(H_{\text{ch},v}^{\iota,\pi} + H_{\text{dis},v}^{\iota,\pi} \right) + C_{\text{chp},t}^{\pi} P_{\text{chp},e,v}^{\iota,\pi} \right] + \sum_t \sum_{\pi} \left[\lambda_{e,v}^{\iota,\pi,k} \left(P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi,k+1} - P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi} \right) + \lambda_{h,v}^{\iota,\pi,k} \left(H_{v,t}^{\pi,k+1} - H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k+1} \right) \right] + \sum_t \sum_{\pi} \left[\frac{\rho_v^k}{2} \left(P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi,k+1} - P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi} \right)^2 + \frac{\rho_v^k}{2} \left(H_{v,t}^{\pi,k+1} - H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k+1} \right)^2 \right] \quad (43)$$

同时, v_{max} 个EH都需要满足EH的约束方程式(19)–(30)。

分布式优化模型中原始残差和对偶残差要满足停止条件,分别如式(44)和式(45)所示。

$$\left[\sum_t \sum_{\pi} \sum_v \left(P_{\text{eth},v}^{\iota,\pi,k+1} - P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi,k+1} \right)^2 + \sum_t \sum_{\pi} \sum_v \left(H_{v,t}^{\pi,k+1} - H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k+1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon^{\text{pri}} \quad (44)$$

$$\left\{ \sum_t \sum_{\pi} \sum_v \left[\rho_v^{k+1} \left(P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi,k+1} - P_{\text{hte},v}^{\iota,\pi,k} \right)^2 + \sum_t \sum_{\pi} \sum_v \left[\rho_v^{k+1} \left(H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k+1} - H_{\text{hth},v}^{\iota,\pi,k} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon^{\text{dual}} \quad (45)$$

2.4 模型求解

计及多个EH的电热综合能源系统分布式优化求解流程图,如图3所示。

3 算例分析

3.1 基础数据

在改进的IEEE 33节点辐射状配电网、32节点巴厘岛热网^[21]以及3个EH组成的算例系统中进行测试,测试系统拓扑图如图4所示,其中EH结构如图1所示。在3个EH中,EH₁中的可再生能源为光伏,EH₂中的可再生能源为风电,EH₃未配置可再生能源。配电网总电负荷为3.715+j2.3 MV·A,热网总

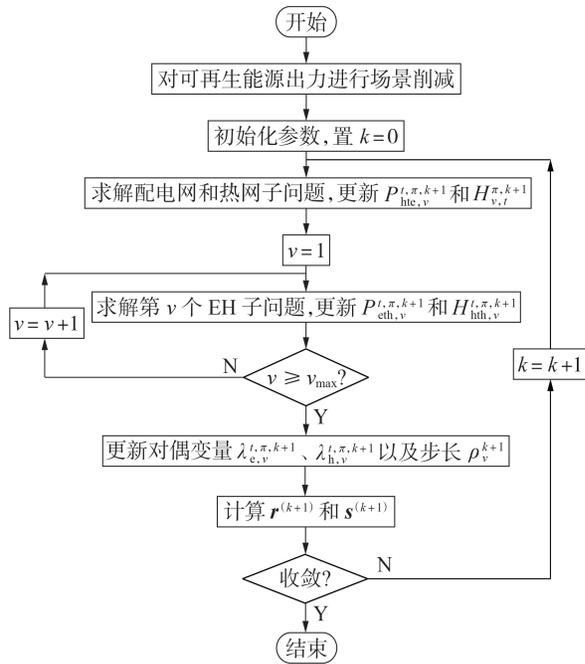


图 3 模型求解流程图

Fig.3 Flowchart of model solution

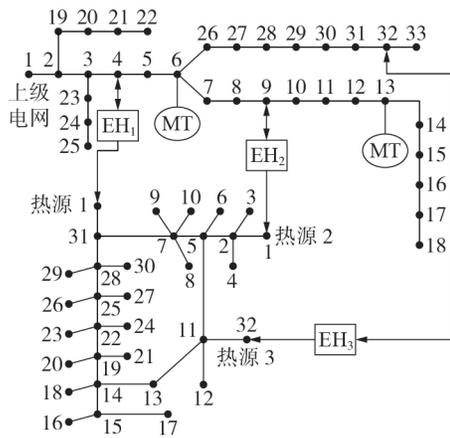


图 4 测试系统拓扑

Fig.4 Topology of test system

热负荷为 2.164 MW。在配电网的节点 6、13 分别加入最大出力为 1 MW 的 MT。EH 中 CHP 机组、电锅炉最大输入功率为 1 MW, 储能容量为 1 MW·h。传统 ADMM 中, 原始残差容忍上限 ε^{pri} 、对偶残差容忍上限 ε^{dual} 设置为 5×10^{-4} ; 自适应步长 ADMM 中, μ 设置为 10, τ^{incr} 和 τ^{decr} 设置为 2。光伏、风电经过同步回代法削减得到 20 个典型场景, 其日出力曲线如附录 A 图 A1 所示。从上级电网购电电价采用美国 PJM 市场实际电价数据^[22], 如附录 A 图 A2 所示。购气价格为 0.03 \$ / (kW·h)。日负荷曲线如附录 A 图 A3 所示。设备参数、储能参数分别如附录 A 表 A1、A2 所示。本文将配电网和热网作为一个子问题, 将 3 个 EH 作为 3 个子问题, 所构建的模型是一个二次规划问题, 在 GAMS 仿真平台调用 MOSEK 求解器进

行求解。

3.2 分布式与集中式优化结果对比分析

分别采用集中式优化方法和分布式优化方法对模型进行求解, 所得结果如表 1 所示。由表可知, 在不同步长下, 采用传统 ADMM 的分布式算法与集中式的优化调度结果完全一致, 说明分布式算法能找到全局最优解, 实现不同主体之间的协同优化和自治决策。集中式模型与分布式模型所需信息和调度示意图如附录 B 表 B1 和图 B1 所示。集中式调度中系统控制中心需要收集综合能源系统以及各 EH 运行信息。分布式调度中, 区域系统运营商收集配电网和热网运行信息, 各 EH 运营商收集 EH 运行信息, 综合能源系统与各个 EH 之间的调度独立, 仅需交互边际能量流 (综合能源系统与 EH 连接处的电功率和热功率) 信息。与集中式计算时间 3.91 s 相比, 尽管分布式 ADMM 的计算时间更长, 但集中式算法要获取完整的能源用户信息, 在实际工程中难以实现。

表 1 集中式和分布式优化结果对比

Table 1 Comparison of centralized and distributed optimization results

方式	综合能源系统成本 / \$	EH ₁ 成本 / \$	EH ₂ 成本 / \$	EH ₃ 成本 / \$	总成本 / \$	迭代次数	计算时间 / s	
集中式	3556.9	672.2	605.6	370.8	5205.5	—	3.91	
分布式	$\rho=0.1$	3556.9	672.2	605.6	370.8	5205.5	109	570
	$\rho=1$	3556.9	672.2	605.6	370.8	5205.5	31	158
	$\rho=10$	3556.9	672.2	605.6	370.8	5205.5	63	326
	$\rho=50$	3556.9	672.2	605.6	370.8	5205.5	76	388

另外, 从表 1 中可以看出, 在 4 种不同的步长下, 迭代次数和计算时间有明显的区别。在步长 ρ 很小时, 收敛速度比较慢; 在 $\rho \geq 1$ 之后, 随着步长的增大, 迭代次数增多, 收敛时间增加。因此, 选择合适的步长, 可以得到更好的计算效果。

图 5 展示了当步长 $\rho=1$ 时各子问题的成本收敛情况。由图可知, 在迭代初始时刻, 各子区域成本变化较大, 随着各子区域接收到相邻子区域信息, 各区域对自身进行调整来达到整个电热综合能源系统的功率平衡。

表 2 展示了 EH 中配置不同储能时的成本对比。由表可知, 未配置储能时, EH₁ 成本略有增加, EH₂ 和 EH₃ 成本略有减少, 而综合能源系统成本提高得较多, 最终总成本升高, 这也可以说明 EH 中配置储能可以利用差价进行充、放电 / 热, 提高系统经济性。

3.3 分布式优化收敛性分析

表 3 展示了传统 ADMM 和自适应步长 ADMM 的计算结果对比。可见传统 ADMM 对步长的依赖性很高, 而采用基于自适应步长 ADMM 的算法, 根据原始残差和对偶残差之间的关系, 自动调节步长大小,

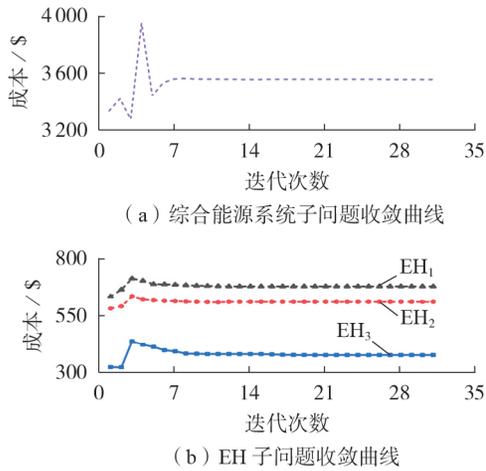


图5 ADMM的成本收敛曲线

Fig.5 Cost convergence curves of ADMM

表2 3种情形下的成本对比

Table 2 Cost comparison under three conditions

单位: \$

方式	综合能源系统成本	EH ₁ 成本	EH ₂ 成本	EH ₃ 成本	总成本
无储能	3678.9	674.5	565.4	366.6	5285.4
有电储能	3607.1	674.5	586.1	370.8	5238.5
有电、热储能	3556.9	672.2	605.6	370.8	5205.5

表3 2种算法结果对比

Table 3 Comparison of results between two algorithms

算法	步长	迭代次数	计算时间 / s
传统ADMM	$\rho=0.1$	109	570
	$\rho=1$	31	158
	$\rho=50$	76	388
自适应步长ADMM	$\rho=0.1$	31	161
	$\rho=1$	29	150
	$\rho=50$	39	197

收敛稳定性明显提升。

图6展示了 $\rho=0.1$ 时2种算法收敛情况的对比。由图可知,传统ADMM的对偶残差达到 5×10^{-4} 之后

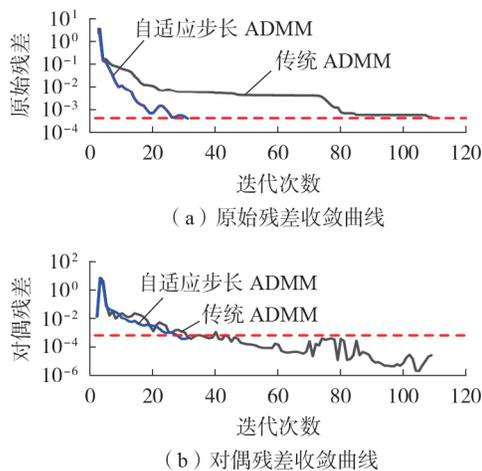


图6 2种算法收敛情况对比

Fig.6 Comparison of convergence situation between two algorithms

发生振荡,在随后的迭代中总体呈现下降趋势,但原始残差下降缓慢,需迭代109次才能达到收敛门槛 5×10^{-4} 。而自适应步长ADMM只需迭代31次,对偶残差和原始残差均达到收敛门槛 5×10^{-4} 。

3.4 EH与配电网和热网交互功率分析

EH与配电网交互电功率、与热网交互热功率,根据系统整体成本最小来交互功率,最终达到功率平衡。3个EH的电能平衡图、热能平衡图分别如附录C图C1、C2所示。EH与配电网、热网交互功率分别如图7、8所示。

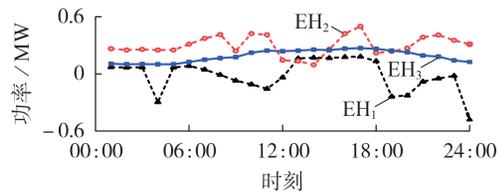


图7 各EH与配电网功率交互示意图

Fig.7 Schematic diagram of power interaction between EHs and distribution network

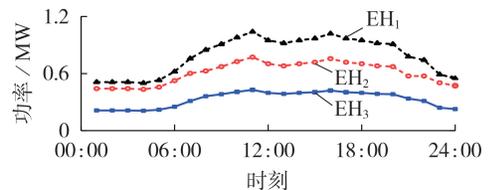


图8 各EH与热网功率交互示意图

Fig.8 Schematic diagram of power interaction between EHs and heating network

各EH为了得到更好的经济性,CHP机组产生的电能将优先用于电锅炉“电转热”或者储电,剩余电量可以传输给配电网,在功率不足时需配电网向EH传输功率。由附录C图C1以及图7可以看出,由于功率约束,各EH中电、热功率均在约束范围内,保证了系统的安全性。值得注意的是,对于EH难以消纳的风电/光伏功率,可通过电锅炉“电转热”或者与配电网交互,因此风电/光伏输出的电功率得到了充分消纳。EH₁所连热源1需要最多的热能,在04:00、08:00—12:00以及19:00—24:00时,CHP和光伏产生的全部电功率用于电锅炉“电转热”也不能满足热能需求,需要配电网向EH₁传输功率来弥补功率缺额,而其余时间EH₁可以向配电网传输功率。在EH₂、EH₃中,EH产生功率大于消耗功率,全部时间向配电网传输功率。

同时,从图7可知,与EH₃相比,EH₁和EH₂与配电网功率交互曲线更加陡峭,且在大部分时间,EH₂向配电网传输最多的电能,EH₁向配电网传输最少的电能。

在EH与热网的交互中,EH提供热源所需的热能。由附录C图C2和图8可知,在热源1—3中,热

源所需热能依次减少,因此, EH_1 向热网传输最多的热能, EH_3 向热网传输最少的热能,且3个EH向热网传输功率随时间变化趋势相似。

4 结论

本文建立了计及多EH的电热综合能源系统分布式优化模型,将EH作为基本决策主体,将配电网和热网作为另一决策主体,实现EH在电热综合能源系统中的分布式能量交互,并采用自适应步长ADMM对模型进行求解。所得结论如下:

1) 分布式优化可以得到与集中式优化相同的结果,实现各区域自治决策,保护系统隐私,降低通信要求;

2) 传统ADMM对步长依赖性高,采用自适应步长ADMM可提高算法收敛的稳定性,在初始步长下,传统ADMM收敛速度越慢,自适应步长ADMM收敛速度提升越明显;

3) 在EH与配电网、热网的功率交互中,电、热功率均在约束范围中,保证了系统的安全运行,同时,考虑储电和储热可提高系统的经济性。

在后续工作中,笔者将继续围绕分布式优化开展深入研究。本文模型主要考虑多EH和电热综合能源系统的分布式能量交互,未来可以进一步考虑多能源微网之间的分布式调度问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 3-11.

[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] 董今妮,孙宏斌,郭庆来,等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术,2016,40(6):1635-1641.
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1635-1641.

[4] 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):3292-3305.
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): 3292-3305.

[5] 孙娟,卫志农,孙国强,等. 计及P2H的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqing, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy sys-

tem with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.

[6] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.

[7] 崔雪,邹晨露,王恒,等. 考虑风电消纳的电热联合系统源荷协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):74-81.
CUI Xue, ZOU Chenlu, WANG Heng, et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 74-81.

[8] 崔杨,姜涛,仲悟之,等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J]. 电网技术,2020,44(7):2474-2482.
CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Source-load coordination economic dispatch method for regional integrated energy system considering wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2474-2482.

[9] LI R, WEI W, MEI S, et al. Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: an MPEC approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 3641-3653.

[10] 谢华宝,戴赛,许丹,等. 热网特性对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):36-43.
XIE Huabao, DAI Sai, XU Dan, et al. Influence of heat network characteristics on abandoned wind absorption effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 36-43.

[11] YI Z, XU Y, HU J, et al. Distributed, neurodynamic-based approach for economic dispatch in an integrated energy system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(4): 2245-2257.

[12] KIM H, LEE J, BHAHAB S, et al. Direct energy trading of microgrids in distribution energy market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 639-651.

[13] 王家怡,高红均,刘友波,等. 考虑风电不确定性的交直流混合配电网分布式优化运行[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):550-562.
WANG Jiayi, GAO Hongbo, LIU Youbo, et al. A distributed operation optimization model for AC/DC hybrid distribution network considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 2020, 40(2): 550-562.

[14] 张勇,李晨,贾楠,等. 基于改进二阶锥松弛的多区域电-气综合能源系统优化调度快速求解方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):39-45.
ZHANG Yong, LI Chen, JIA Nan, et al. Fast solution method for optimal dispatching of multi-area integrated electricity-gas systems based on improved second-order cone relaxation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 39-45.

[15] 陈健,张维桐,林达,等. 基于改进交替方向乘子法的电-气-热系统分布式优化调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):50-58.
CHEN Jian, ZHANG Weitong, LIN Da, et al. Distributed optimal dispatch of integrated electricity-gas-heating system based on improved alternative direction multiplier method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 50-58.

[16] 史佳琪,胡浩,张建华. 计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术,2019,43(1):150-159.
SHI Jiaqi, HU Hao, ZHANG Jianhua. Distributed low-carbon economy scheduling for integrated energy system with multiple individual energy-hubs[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 150-159.

[17] MU C, DING T, QU M, et al. Decentralized optimization ope-

- ration for the multiple integrated energy systems with energy cascade utilization[J]. Applied Energy,2020,280:115989.
- [18] YE H,GAYME D,LOW S. Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(3):1656-1663.
- [19] PIROUTI M,BAGDANACICIUS A,EKANAYAKE J,et al. Energy consumption and economic analyses of a district heating network[J]. Energy,2013,57(8):149-159.
- [20] BOYD S,PARIKH N,CHU E,et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations and Trends in Machine Learning,2011,3(1):1-122.
- [21] LIU X,JENKINS N,WU J,et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Energy Procedia,2014,61:155-159.
- [22] FENG C,WEN F,ZHANG L,et al. Decentralized energy

management of networked microgrid based on alternating-direction multiplier method[J]. Energies,2018,11(10):1-18.

作者简介:



程恩林

程恩林(1997—),男,河南焦作人,硕士研究生,主要研究方向为电热综合能源系统优化调度(**E-mail**:793237897@qq.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为综合能源系统、电力系统运行分析与控制(**E-mail**:wzn_nj@263.net);

嵇文路(1974—),男,江苏淮安人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统自动化(**E-mail**:jiwenlu@126.com)。

(编辑 李玮)

Distributed optimization of integrated electricity-heat energy system considering multiple energy hubs

CHENG Enlin¹, WEI Zhinong¹, JI Wenlu², YE Ting², CHEN Sheng¹, ZHOU Yizhou¹, SUN Guoqiang¹

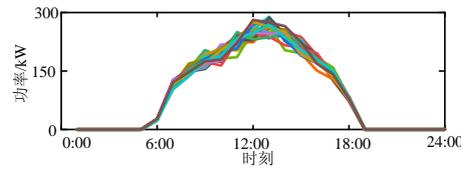
(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

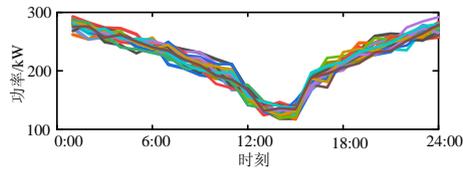
Abstract: Due to the lack of information sharing, privacy protection and so on for subjects in the integrated electricity-heat energy system, the autonomous decision-making and communication security of different subjects in the region become crucial. Therefore, a distributed optimization method of integrated electricity-heat energy system based on ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) is proposed to realize the autonomous decision-making and distributed optimization of EH (Energy Hub) in the integrated electricity-heat energy system. The optimal dispatching model of the integrated electricity-heat energy system and EH is established, and then, the distributed optimization model of the integrated electricity-heat energy system based on ADMM is established, which realizes the distributed power interaction between the integrated energy system operator and multiple EH operators. At the same time, the adaptive step size method is used to solve the constructed model, so that improving the convergence of algorithm.

Key words: integrated electricity-heat energy system; energy hub; distributed optimization; ADMM; power interaction

附录 A



(a)光伏出力曲线



(b)风电出力曲线

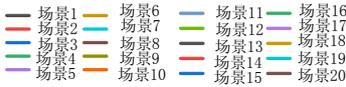


图 A1 可再生能源日出力曲线

Fig.A1 Daily curves of renewable energy output

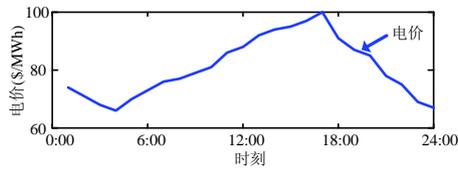


图 A2 日电价曲线

Fig.A2 Daily curves of electricity price

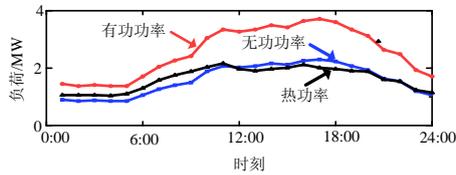


图 A3 日负荷曲线

Fig.A3 Daily curves of load

表 A1 设备参数

Table A1 Equipment parameters

设备	$C[\$/(\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	η
MT	0.04	—
CHP	0.01	电: 0.3, 热: 0.45
电锅炉	0.012	0.9

表 A2 电储能和热储能参数

Table A2 Electric energy storage and thermal energy storage parameters

参数	数值
容量	1 MW · h
最大功率	0.3 MW
运行成本	0.005 \$/ (kW · h)
充电、热效率	0.95
放电、热效率	0.95
SOC 上、下限	0.9、0.1

附录 B

表 B1 集中式模型与分布式模型信息需求表

Table B1 Information requirement table of centralized model and distributed model

模型	信息需求
集中式	配电网中有功功率、无功功率、支路功率、电压，热网中节点温度、管道始端和末端温度、热源与负荷功率，EH 中 CHP 功率、电锅炉功率、风电功率、光伏功率、储能充放电功率
分布式	配电网中有功功率、无功功率、支路功率、电压，热网中节点温度、管道始端和末端温度、热源与负荷功率
EH	CHP 功率、电锅炉功率、风电功率、光伏功率、储能充放电功率

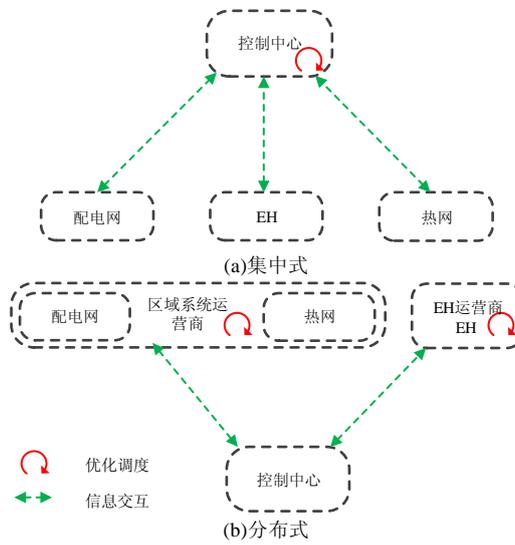
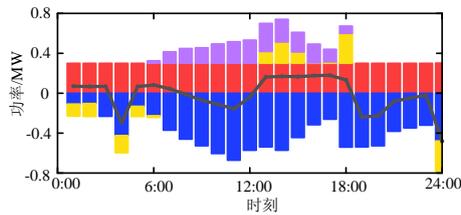


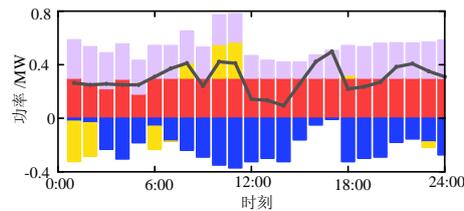
图 B1 优化调度示意图

Fig.B1 Diagram of optimal dispatching

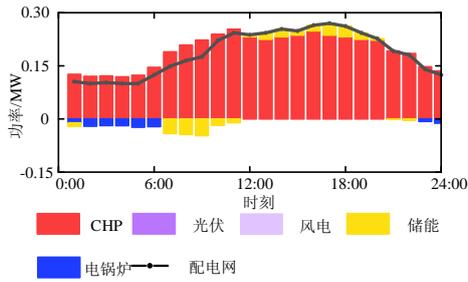
附录 C



(a)EH₁ 电能平衡图



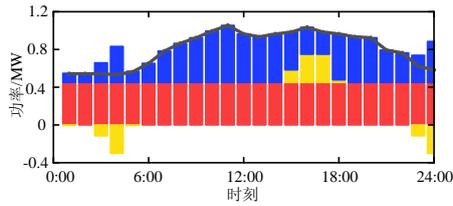
(b)EH₂ 电能平衡图



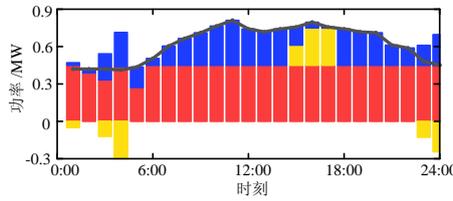
(c)EH₃ 电能平衡图

图 C1 EH 电能平衡图

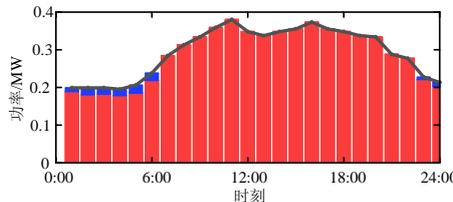
Fig.C1 Power balance diagram of EH



(a)EH₁ 热能平衡图



(b)EH₂ 热能平衡图



(c)EH₃ 热能平衡图

图 C2 EH 热能平衡图

Fig.C2 Heat balance diagram of EH