

考虑碳交易和信息物理故障的综合能源系统优化运行

郑焕坤, 李钰静

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 综合能源系统作为一种多能流耦合系统,在能源协调优化、降低碳排放量方面都有着重要地位,是实现“双碳”目标的一种有效途径。综合能源信息物理系统的稳定安全运行对于综合能源系统的经济运行有着很大影响,为了研究信息和物理故障对综合能源信息物理系统经济运行的影响,文章从综合能源信息物理系统模型出发,利用各种故障的概率模型,并引入基于 Shapley 值的碳交易模型,以系统外购能源成本、碳交易成本之和最小为目标函数,建立综合能源信息物理系统经济运行模型,并提出运行成本评估指标进行分析。算例分析表明,基于 Shapley 值的碳交易模型可以更合理地进行碳责任分摊;信息和物理故障都会使综合能源信息物理系统运行成本增加,燃气轮机子系统在综合能源信息物理系统经济运行中的重要程度最大,燃气锅炉和热泵次之,电转气(power to gas, P2G)设备的重要程度最低。

关键词: 综合能源信息物理系统;故障概率模型;基于 Shapley 值的碳交易模型;运行成本评估指标

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2025.12.001

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2025)12-0001-10

Optimization operation of integrated energy system considering carbon trading and information physical failures

ZHENG Huankun, LI Yujing

(School of Electronic and Electrical Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: As a multi-energy flow coupling system, integrated energy system has an important position in energy coordination and optimization and carbon emission reduction, which is an effective way to achieve the goal of "carbon peaking and carbon neutrality goals". The stable and safe operation of the integrated energy cyber-physical system has great influence on the economic operation of the integrated energy system. In order to study the impact of information and physical failures on the economic operation of integrated energy system, this paper starts from the model of integrated energy cyber-physical system, adopts the probability model of various failures, and adopts the carbon trading model based on Shapley value to minimize the sum of purchased energy cost and carbon trading cost. As the objective function, the economic operation model of the integrated energy cyber-physical system is established, and the operational cost evaluation indicators are proposed for analysis. The case study shows that the carbon trading model based on Shapley value can be more reasonable for carbon responsibility sharing; both physical and information failures will increase the operating cost of the integrated energy cyber-physical system, and the gas turbine subsystem is the most important in the economic operation of the integrated cyber-physical information system, followed by the gas boiler and heat pump, and the power to gas(P2G)equipment is the least important.

Keywords: integrated energy cyber-physical system, failure probability model, carbon trading model based on Shapley value, operational cost evaluation indicator

0 引 言

能源是人类社会生存、发展的重要因素,能源的发展过程推动了人类社会的进步,促进了经济社会的发展^[1]。我国能源发展现如今仍存在能源消

费结构不合理、用能效率低下、碳排放量大等问题。

综合能源系统以多能互补技术为核心,使电力、天然气和其他能源载体灵活转换与利用,对区域内包括新能源在内的冷、热、电、气多种能源统筹规划协调^[2-3],有机协调与优化能源的生产、传输、转换、存储、消费、交易等各个环节,提高用能效率、促

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400800)

进可再生能源消纳,实现能源的高效综合利用^[4-6]。

综合能源系统的运行优化一直是研究的热点问题。文献[7]基于新能源出力不确定性的特点建立了电气综合能源系统优化模型,降低新能源消纳对配电网的影响。文献[8]考虑到不同用户的消费心理建立了考虑综合需求响应不确定性的优化模型,可实现系统经济运行、提高可再生能源消纳水平。文献[9]基于主从博弈框架研究了热电联产、碳捕集和电转气设备联合运行的情况并制定了优化调度策略。

信息物理系统(cyber physical system, CPS)基于计算、通信和控制(3C)策略将物理系统和网络系统有机融合,建立信息、物理有机协作的多维复杂系统模型^[10]。信息物理系统这一概念于 2006 年由美国国家科学基金会提出,受到了各个领域的广泛关注。建立电力信息物理系统模型一直是我国信息物理系统相关研究的热点。文献[10]从控制中心典型应用切入,将 CPS 系统抽象为一个有向拓扑图,提出一种针对能量系统的信息能量融合建模方法与综合评估体系。文献[11]利用关联矩阵将电力系统的物理层和信息层联系起来形成了一个完整的电力信息物理系统模型,但不能对具体故障进行定量分析。文献[12]采用时间函数来描述信息流,并形成了电力信息流的模型建立及分析方法,达到信息系统物理化。上述研究多针对于电力信息物理系统,对于综合能源信息物理系统的研究较少。

综合能源信息物理系统作为多能协调优化运行的系统,其经济可靠运行问题一直备受关注。文献[13]根据信息系统对一次系统的作用类型分类,提出了考虑信息系统功能作用的可靠性模型以及可靠性计算方法,研究了直接作用对一次系统可靠性的影响。本文中信息系统对物理系统的影响考虑的是直接作用的类型,信息系统的功能出现故障会直接导致物理系统设备的故障或不正常工作。文献[14]基于统一能路理论和关联矩阵提出了综合能源信息物理系统分层建模方法并得到了综合能源系统的一体化融合模型,但并未考虑信息系统故障对综合能源信息物理系统造成的经济性影响。

碳交易作为有效降低碳排放量、实现“双碳”目标的一种途径,研究碳交易机制下的综合能源信息物理系统优化运行很有必要。目前文献中对碳交易的研究主要集中在碳交易机制模型。文献[15]建立了考虑碳捕集电厂的多目标模型,动态最优潮流问题中将 CO₂ 排放量作为其中一个目标。文献[16]在电气互联综合能源系统引入碳交易机制,并

研究了碳交易、能源价格和天然气约束条件对系统运行的影响。文献[17]以能源中心为基础,为了考虑信息不完全情况下的优化问题采用分散优化建立了计及碳交易成本的多区域综合能源系统分散调度模型。文献[18]在源侧引入阶梯式碳交易,考虑到系统的经济性和低碳性,建立了电-气-热综合能源系统低碳经济调度模型。文献[19]将基于碳排放流和 Shapley 值的碳交易模型引入了由综合能源网络和能源枢纽结构形成的双层综合能源系统,实现了低碳经济运行。上述文献都是针对综合能源系统进行研究,并未考虑发生信息物理故障时综合能源系统的运行优化情况。

本文以综合能源信息物理系统为研究对象,引入各种故障的概率模型形成设备的多时段运行状态模型;并采用基于 Shapley 值的碳交易模型进行碳排放责任分配认定;以系统外购能源成本、碳交易成本之和最小为目标函数,建立综合能源信息物理系统经济运行模型,根据提出的运行成本评估指标进行分析,得出综合能源信息物理系统发生信息和物理故障时对经济运行的影响。

1 综合能源信息物理系统

1.1 综合能源信息物理系统体系结构

本文考虑的综合能源信息物理系统体系结构由上层系统信息系统和下层系统物理系统组成,如图 1 所示。物理系统将获取的系统运行数据信息传输给信息系统,信息系统将决策信息传递给物理系统。

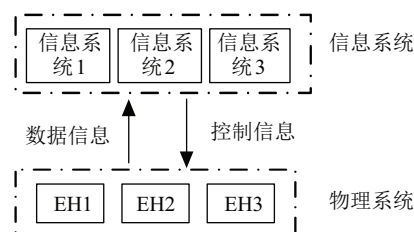


图 1 综合能源信息物理系统体系结构

Fig. 1 System architecture of the integrated energy cyber physical system

本文对综合能源物理系统进行建模利用能量枢纽(energy hub, EH)模型,如图 2 所示。基于 EH 模型,可以清晰得出综合能源系统的架构及其中的各种能量流动情况。每个 EH 的输入端由风电、外购电能和天然气组成;内部能源转化设备有热泵、燃气轮机、燃气锅炉和 P2G 设备;输出端由电负荷、热负荷和气负荷组成,并配备有储电、储热、储气装置。

1.2 信息物理系统结构

信息物理系统包含信息系统和物理系统两部分。信息系统负责实现信息交流、传输和共享等,

物理系统则负责能量的传输和转换。信息系统由信息通信设备、拓扑结构、通信协议及软件等组成。物理系统由能源生产设备、能源转化设备、储能设备和负荷组成。

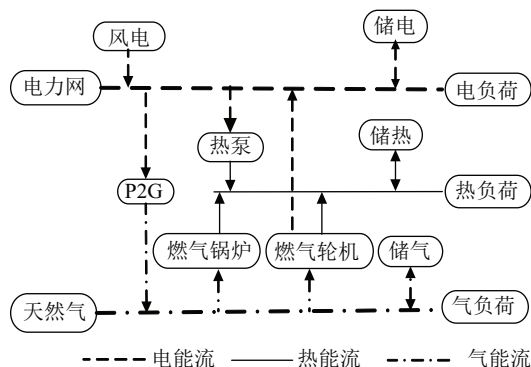


图2 物理系统构成及其能量流

Fig. 2 Physical system composition and energy flow

如图3所示,在综合能源信息物理系统中信息系统中的信息流和传统综合能源系统中的能量流相互耦合,整个系统采用分布式控制方式,每个子系统中的服务器都作为独立决策个体,相互通信获得信息^[20]。

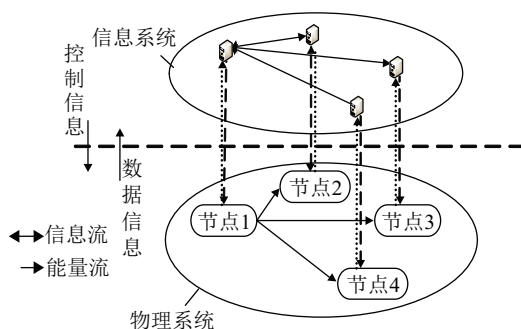


图3 综合能源信息物理系统交互图

Fig. 3 Interactive diagram of integrated energy cyber physical system

2 故障概率模型和基于 Shapley 值的碳交易模型

2.1 故障概率模型

基于马尔科夫过程的蒙特卡洛法可以实现动态蒙特卡洛模拟,抽样分布随着模拟的过程改变,更加符合系统的实际运行状况^[21]。

两状态马尔科夫模型如图4所示,节点代表能量转化设备的运行状态,状态1和状态0分别表示设备的正常和故障两种运行状态,弧线表示设备的状态转移情况。 λ 和 μ 分别表示设备的故障概率和修复概率^[22]。

忽略掉期间发生二次以上转移的概率,设备的两种运行状态之间的转移概率如下:

$$P[X(t + \Delta t) = 0 | X(t) = 1] = p_{01} \approx \lambda \Delta t \quad (1)$$

$$P[X(t + \Delta t) = 1 | X(t) = 0] = p_{10} \approx \mu \Delta t \quad (2)$$

$$P[X(t + \Delta t) = 1 | X(t) = 1] = p_{00} \approx 1 - \lambda \Delta t \quad (3)$$

$$P[X(t + \Delta t) = 0 | X(t) = 0] = p_{11} \approx 1 - \mu \Delta t \quad (4)$$

令 $p_i(t) = P\{X(t) = i\}$ 代表设备 t 时刻处于 i 运行状态的概率。根据全概率公式可得到 t 时刻设备处于两种运行状态的概率,如式(5)所示。

$$\begin{cases} p_1(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \\ p_0(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} - \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $p_1(t)$ 、 $p_0(t)$ 分别为 t 时刻时设备处于正常、故障状态的概率。综合能源系统中的能源转化设备用上述状态模型表示其运行正常和故障两种状态,假设只有该设备存在这两种状态,其他设备正常运行。除此之外,设备的维修时间一般大于运行周期步长,故认为在运行周期步长内设备发生故障无法修复,其修复概率 $\mu = 0$ 。故该设备的运行状态模型为:

$$p(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

用马尔科夫过程蒙特卡洛来模拟设备的运行状态,上述运行状态模型得到的停运概率 $p(t)$,在 $[0, 1]$ 均匀分布区间中进行随机抽样得到随机数 R_i ,将两值进行比较可得到设备的多时段运行状态模型 s_i :

$$s_i = \begin{cases} 1(\text{正常运行}), & R_i > p(t) \\ 0(\text{故障状态}), & 0 \leq R_i \leq p(t) \end{cases} \quad (7)$$

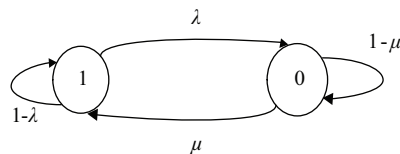


图4 两状态马尔科夫模型

Fig. 4 Two-state Markov model

2.2 基于 Shapley 值的碳交易模型

碳交易机制主要由碳排放配额、碳排放量和碳交易价格三部分组成。碳排放配额的分配方法有无偿分配法和有偿分配法,无偿分配法由政府部门进行分配,免费向各企业发放;有偿分配法是企业通过有偿的方式购买。我国现如今主要采用无偿分配方式。

各企业通过无偿分配得到的碳排放配额决定

着企业可免费进行碳排放量的大小。当碳排放量小于分得配额时,可将碳排放配额进行出售;而碳排放量大于分得配额时,则需向其他企业购买碳排放配额。

碳排放配额的分配机制是碳交易机制中很重要的一步。Shapley 值法可以体现出联盟成员对联盟目标贡献程度或责任,是一种多人合作博弈的求解方法。综合能源信息物理系统的碳排放责任分摊中引入 Shapley 值法,可以计算每个能源枢纽的碳排放责任并合理分配碳排放配额。

各子成员的碳排放责任计算如下:

$$c_{\text{CO}_2,i,t} = \begin{cases} 0, & \\ \lambda_1(E_{\text{CO}_2,i,t} - x_{\min}), & \\ \lambda_1(x_{\text{mid}} - x_{\min}) + \lambda_2(E_{\text{CO}_2,i,t} - x_{\text{mid}}), & \\ \lambda_1(x_{\text{mid}} - x_{\min}) + \lambda_2(x_{\max} - x_{\text{mid}}) + \lambda_3(E_{\text{CO}_2,i,t} - x_{\max}), & x_{\max} \leq E_{\text{CO}_2,i,t} \end{cases}$$

式中: $c_{\text{CO}_2,i,t}$ 是能量枢纽 i 在 t 时刻的碳交易成本; $c_{\text{CO}_2,i,t}$ 为能量枢纽 i 在 t 时刻的碳排放量; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为三个阶梯碳交易的单价,单位为元/t CO_2 。

3 综合能源信息物理系统经济运行模型

物理系统是动态的,它主要由能源输入、转化设备、储能设备以及负荷端与能量流物理连接而组成。相比之下,网络系统是一个静态系统,由信息通信设备通过信息流通信网络连接组成^[24]。物理系统中能源转化设备的停运或故障将破坏能量流的稳定流动,而信息系统中设备故障也会对信息流造成一定干扰,破坏数据的及时性、完整性和有效性。由物理故障和信息故障导致的不正常的能量流和信息流会影响综合能源信息物理系统运行的安全性和经济性。

3.1 信息系统静态模型

信息系统的通信性能主要由通信节点性能、支路性能和拓扑结构决定,本文采用邻接矩阵描述通信网拓扑结构特性,并建立数学模型。基于通信节点和支路模型对信息系统拓扑关系进行建模,建立表示信息设备连接关系的邻接矩阵 $\mathbf{C}$ 如下:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1j} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{i1} & \cdots & C_{ij} & \cdots & C_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nj} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: C_{ij} 的值代表节点 i 与节点 j 之间的连接关系,若无直接连接关系,则 C_{ij} 的值为 0。

系统中采用分布式控制,各服务器需已知全部或部分物理节点的状态进行决策过程。在通信网

$$x_i = \sum_{S \subseteq N/i} P(S) [c(S \cup \{i\}) - c(S)] \quad (8)$$

$$P(S) = \frac{n_S! (n_N - n_S - 1)!}{n_N!} \quad (9)$$

式中: x_i 是联盟成员 i 分摊的碳排放责任量; S 是前 $n-1$ 个子成员组成的子联盟; $P(S)$ 是 S 子联盟发生的概率; $S \cup \{i\}$ 是包含 S 子联盟和成员 i 的新的联盟; $c(S \cup \{i\}) - c(S)$ 表示成员 i 加入子联盟产生的碳排放责任。子联盟成员承担的碳排放责任应在其边际作用的范围之内^[23]。通过上述计算,可得到碳排放责任边际作用的最大值 $x_{\max}$ 、最小值 $x_{\min}$ 以及平均值 x_{mid} ,故碳交易价格模型如下:

$$\begin{cases} 0 \leq E_{\text{CO}_2,i,t} \leq x_{\min} \\ x_{\min} \leq E_{\text{CO}_2,i,t} \leq x_{\text{mid}} \\ x_{\text{mid}} \leq E_{\text{CO}_2,i,t} \leq x_{\max} \\ x_{\max} \leq E_{\text{CO}_2,i,t} \end{cases} \quad (10)$$

络连通的情况下,各节点服务器均可向其他服务器请求状态,但会造成大量的信息冗余,增大信息系统的负担。建立描述信息系统中各服务器间的信息请求关系的决策关联矩阵 $\mathbf{A}$ 如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1j} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{i1} & \cdots & A_{ij} & \cdots & A_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nj} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: A_{ij} 的值代表决策前节点 i 与节点 j 之间信息请求关系,若无需发送信息请求,则 A_{ij} 的值为 0。

3.2 信息系统工作流程分析与建模

整个信息系统作用过程经历“物理-信息-物理”的转换,在不考虑中间环节函数错误的情况下^[25],物理系统发生运行错误则是因为元件故障的出现。

信息系统的工作流程如图 5 所示,具体的工作步骤如下:1) 能源设备状态收集的能量流通过信息子系统中的传感器转换为信息流上传至交换机,后发送到服务器;2) 服务器接收采样信息后,根据优化目标进行决策,实现对物理系统的远程调控;3) 决策结果由交换机接收后发送至执行器,后发送至能源设备;4) 能源设备根据控制命令作出相应运行状态调整;运行返回步骤 1)。

各信息子系统的服务器之间通过光纤连接,每个信息子系统中的能源设备、传感器、交换机、服务器、执行器也是通过光纤连接。信息子系统在信息传输过程中的任一环节出现工作异常,如信息上传、决策制定、决策下发等,都会导致整个信息作用

流程不能完整进行,物理子系统都不会做出状态调整,而是按照上一时刻决策结果运行。

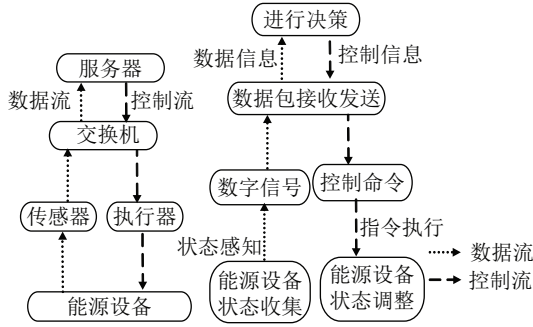


图 5 信息系统工作流程

Fig. 5 Cyber system workflow

从系统运行角度建立信息系统对物理系统作用可靠性模型如下:

$$P_{t,C-P} = P_{t,sens} P_{t,swit} P_{t,ser} P_{t,actu} P_{t,fibr} \quad (13)$$

式中: $P_{t,sens}$ 、 $P_{t,swit}$ 、 $P_{t,ser}$ 、 $P_{t,actu}$ 、 $P_{t,fibr}$ 的值为 1 或 0, 分别表示信息子系统中的传感器、交换机、服务器、执行器、光纤在 t 时刻的正常和故障两种运行状态。当 $P_{t,C-P}$ 为 1 时表示 t 时刻信息作用功能运行正常, 综合能源信息物理系统信息作用过程按照信息系统的工作流程步骤进行, 为 0 时表示作用功能出现异常, 物理子系统按照上一时刻决策结果运行, 不会做出相应状态调整。

3.3 考虑信息作用的综合能源信息物理系统模型

综合能源信息物理系统模型如图 6 所示, 由信息系统和物理系统两部分组成, 信息系统中的信息流和物理系统的能量流相互耦合, 信息系统由信息通信设备、拓扑结构、通信协议及软件等组成, 物理系统由能源输入、转化设备、储能设备和负荷组成。物理系统将获取的系统运行数据信息传输给信息系统, 信息系统将决策信息传递给物理系统。

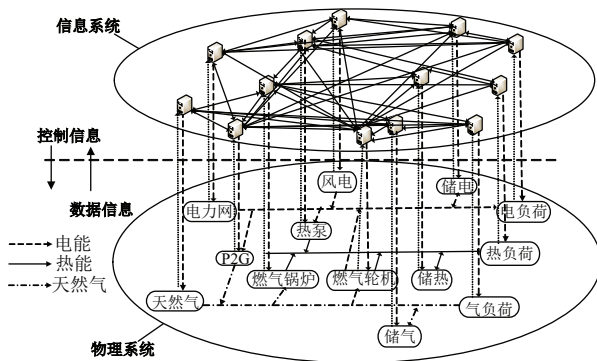


图 6 综合能源信息物理系统模型

Fig. 6 Integrated energy cyber physical system model

3.3.1 目标函数

综合能源信息物理系统经济运行模型以综合能源系统外购能源成本、碳交易成本之和最小为目标函数:

$$F = \min(F_E + F_C) \quad (14)$$

$$F_E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} \lambda_{e,t} E_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} \lambda_{g,t} \frac{G_{i,t}}{Q_{gas}} \quad (15)$$

$$F_C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{I_{EH}} c_{CO_2,i,t} \quad (16)$$

式中: I_{EH} 为系统 EH 数量; F_E 为外购能源成本, 是外购电能成本和外购天然气成本之和; F_C 为碳交易总成本; $\lambda_{e,t}$ 为各时刻电价; $E_{i,t}$ 为 t 时刻外购电功率; $\lambda_{g,t}$ 为气价; $G_{i,t}$ 为 t 时刻外购天然气功率; Q_{gas} 为天然气热值。

3.3.2 约束条件

EH 的输入端是电能和天然气两种能源输入, 能源转化设备有热泵、燃气轮机、燃气锅炉和 P2G 设备, 输出端由电负荷、热负荷和气负荷组成。以 EH1 为例, 能源转化设备的转化式如下:

$$\eta_{GT,gE} G_t^{GT} = E_t^{GT,gE} \quad (17)$$

$$\eta_{GT,gH} G_t^{GT} = H_t^{GT,gH} \quad (18)$$

$$\eta_{GF} G_t^{GF} = H_t^{GF} \quad (19)$$

$$\eta_{HP} E_t^{HP} = H_t^{HP} \quad (20)$$

$$\eta_{P2G} E_t^{P2G} = G_t^{P2G} \quad (21)$$

式中: G_t^{GT} 、 G_t^{GF} 分别为 t 时刻燃气轮机和燃气锅炉消耗的天然气功率; E_t^{HP} 、 E_t^{P2G} 为 t 时刻热泵和 P2G 设备消耗的电功率; $\eta_{GT,gE}$ 、 $\eta_{GT,gH}$ 、 η_{GF} 、 η_{HP} 、 η_{P2G} 分别为燃气轮机气电转化效率、燃气轮机气热转化效率、燃气锅炉气热转化效率、热泵的电热转化效率和 P2G 设备电气转化效率; $E_t^{GT,gE}$ 、 $E_t^{GT,gH}$ 分别为 t 时刻燃气轮机产生的电功率和热功率; H_t^{GF} 为 t 时刻燃气锅炉产生的热功率; H_t^{HP} 为 t 时刻热泵产生的热功率; G_t^{P2G} 为 t 时刻 P2G 设备产生的天然气功率。

储能设备调节灵活, 对负荷起到削峰填谷的作用, 在物理系统中主要包括电能、热能和天然气 3 种类型。储能设备在各时段内不能同时进行储能和放能, 并且要满足储能上下限约束:

$$0 \leq \lambda_t^{charge,x} + \lambda_t^{discharge,x} \leq 1 \quad (22)$$

$$\lambda_t^{charge,x} X_{charge}^{min} \leq X_t^{charge} \leq \lambda_t^{charge,x} X_{charge}^{max} \quad (23)$$

$$\lambda_t^{discharge,x} X_{discharge}^{min} \leq X_t^{discharge} \leq \lambda_t^{discharge,x} X_{discharge}^{max} \quad (24)$$

式中: 上标 x 为能源类型, 分别用 e、h、g 表示电能、热能和天然气三种能源形式; $\lambda_t^{charge,x}$ 、 $\lambda_t^{discharge,x}$ 分别为 t 时刻储能设备的充、放电状态, 充放电状

态由 1 和 0 表示是否处于该状态;式(22)表示储能设备充放电状态不能同时存在。 X 用 E、H、G 表示电能、热能和天然气三种能源类型; $X_{\text{charge}}^{\max}$ 、 $X_{\text{charge}}^{\min}$ 、 X_t^{charge} 分别表示储能设备在充电状态时充电功率的上下限以及储能设备 t 时刻的充电功率; $X_{\text{discharge}}^{\max}$ 、 $X_{\text{discharge}}^{\min}$ 、 $X_t^{\text{discharge}}$ 分别表示储能设备在放电状态时放电功率的上下限以及储能设备 t 时刻时的放电功率。

设备在运行时需满足系统中功率平衡的约束,式(25)~式(27)为考虑信息物理故障的电、热、气功率平衡运行约束:

$$s_t^{\text{GT}}(P_{t,C-P}^{\text{GT}}E_t^{\text{GT,gE}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{GT}})E_{t-1}^{\text{GT,gE}}) + E_t^{\text{discharge}} + E_t + E_t^{\text{WT}} = s_t^{\text{P2G}}(P_{t,C-P}^{\text{P2G}}E_t^{\text{P2G}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{P2G}})E_{t-1}^{\text{P2G}}) + s_t^{\text{HP}}(P_{t,C-P}^{\text{HP}}E_t^{\text{HP}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{HP}})E_{t-1}^{\text{HP}}) + E_t^{\text{charge}} + L_{t,E} \quad (25)$$

$$s_t^{\text{GT}}(P_{t,C-P}^{\text{GT}}H_t^{\text{GT,gH}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{GT}})H_{t-1}^{\text{GT,gH}}) + s_t^{\text{GF}}(P_{t,C-P}^{\text{GF}}H_t^{\text{GF}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{GF}})H_{t-1}^{\text{GF}}) + s_t^{\text{HP}}(P_{t,C-P}^{\text{HP}}H_t^{\text{HP}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{HP}})H_{t-1}^{\text{HP}}) + H_t^{\text{discharge}} = H_t^{\text{charge}} + L_{t,H} \quad (26)$$

$$s_t^{\text{P2G}}(P_{t,C-P}^{\text{P2G}}G_t^{\text{P2G}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{P2G}})G_{t-1}^{\text{P2G}}) + G_t^{\text{discharge}} + G_t = s_t^{\text{GT}}(P_{t,C-P}^{\text{GT}}G_t^{\text{GT}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{GT}})G_{t-1}^{\text{GT}}) + s_t^{\text{GF}}(P_{t,C-P}^{\text{GF}}G_t^{\text{GF}} + (1 - P_{t,C-P}^{\text{GF}})G_{t-1}^{\text{GF}}) + G_t^{\text{charge}} + L_{t,G} \quad (27)$$

设备出力约束:

$$P_i^{\min} \leq P_{t,i} \leq P_i^{\max} \quad (28)$$

式中: E_t 、 G_t 分别为外购电能功率和天然气功率; E_t^{WT} 为 t 时刻风电设备输入系统的风电功率; s_t^{GT} 、 s_t^{P2G} 、 s_t^{GF} 和 s_t^{HP} 分别为 t 时刻燃气轮机、P2G 设备、燃气锅炉和热泵的运行状态; $L_{t,E}$ 、 $L_{t,H}$ 、 $L_{t,G}$ 分别为 t 时刻系统电负荷、热负荷和气负荷; $P_{t,C-P}^{\text{GT}}$ 、 $P_{t,C-P}^{\text{P2G}}$ 、 $P_{t,C-P}^{\text{GF}}$ 、 $P_{t,C-P}^{\text{HP}}$ 分别为 t 时刻燃气轮机、P2G 设备、燃气锅炉、热泵各信息物理子系统的信息作用功能状态,为 1 表示正常运行,0 表示处于故障状态。 $P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$ 分别为设备的出力功率上下限; $P_{t,i}$ 为第 i 个设备 t 时刻的出力功率。

综合能源系统与外部电网及天然气系统进行能量传输时需满足下式的外购能源约束:

$$\begin{cases} E_t^{\min} \leq \sum E_t \leq E_t^{\max} \\ G_t^{\min} \leq \sum G_t \leq G_t^{\max} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $\sum E_t$ 、 $\sum G_t$ 分别为 t 时刻系统外购电能和天然气功率; $E_t^{\max}$ 、 $E_t^{\min}$ 、 $G_t^{\max}$ 、 $G_t^{\min}$ 分别为系统外购电能和天然气功率的上下限。

3.4 综合能源信息物理系统运行成本评估指标

本文利用指标 $L_{\text{inf}}(i)$ 表示第 i 个信息物理子系统故障时对整个系统运行总成本的影响:

$$L_{\text{inf}}(i) = \frac{F_{\text{cmin}}(i)}{F_{\text{cmin}}} \quad (30)$$

式中: F_{cmin} 为系统正常运行情况下的最低总运行成本; $F_{\text{cmax}}(i)$ 为第 i 个信息或物理子系统故障情况下,系统的最低运行成本。

通过上式,进一步利用指标 $I_{\text{prob}}(i)$ 来反映第 i 个信息物理子系统在综合能源信息物理系统经济运行中的重要程度:

$$I_{\text{prob}}(i) = \frac{L_{\text{inf}}(i) - 1}{\sum_{i=1}^M (L_{\text{inf}}(i) - 1)} \quad (31)$$

式中: M 为系统中信息物理子系统的个数。

4 算例仿真

4.1 算例介绍

本文采用信息系统和物理系统耦合组成的综合能源信息物理系统进行算例分析。综合能源信息物理系统体系结构如图 1 所示,系统拓扑结构如图 6 所示。EH1 基础数据如表 1~表 3 所示,EH2 和 EH3 的负荷为 EH1 的 1/2。部分数据参考文献[26-27],本文利用 Gurobi 进行优化求解,系统以 1 h 为步长进行仿真,仿真时间为 8 760 h,设置以下三种场景进行分析:

场景一:依次进行只考虑 EH1 各子系统中燃气轮机、燃气锅炉、热泵和 P2G 设备子系统能源设备故障概率时,系统的运行成本及运行成本评估指标分析;

场景二:依次进行只考虑 EH1 各子系统中信息设备故障概率时,系统的运行成本及运行成本评估指标分析;

场景三:依次进行同时考虑 EH1 各子系统中信息设备和能源设备故障概率时,系统的运行成本及运行成本评估指标分析。

比较三种场景下综合能源系统运行情况,得出各子系统故障对于综合能源信息物理系统运行的影响并分析其重要程度。

表 1 设备转换系数

Tab. 1 Equipment conversion factor

参数	$\eta_{\text{GT,gE}}$	$\eta_{\text{GT,gH}}$	η_{GF}	η_{HP}
数值	0.3	0.4	0.9	3

表 2 设备参数

Tab. 2 Equipment parameters

单位:MW

$G_{\text{GT}}^{\max}$	$G_{\text{GF}}^{\max}$	$E_{\text{P2G}}^{\max}$	$E_{\text{HP}}^{\max}$	$E_{\text{charge}}^{\max}$
200	200	100	50	60
$E_{\text{discharge}}^{\max}$	$H_{\text{charge}}^{\max}$	$H_{\text{discharge}}^{\max}$	$G_{\text{charge}}^{\max}$	$G_{\text{discharge}}^{\max}$
100	30	40	30	40
$E_t^{\max}$	$E_t^{\min}$	$Q_t^{\max}$	$Q_t^{\min}$	
800	100	500	20	

表 3 各设备故障概率参数

Tab. 3 Parameters for the probability of failure of individual devices

设备	故障概率/(次/a)
服务器	0.001 3
交换机	0.05
执行器	0.06
传感器	0.06
光纤	0.004
燃气轮机	2.00
燃气锅炉	4.015
热泵	0.042 3
P2G 设备	0.05

4.2 基于 Shapley 值的负荷侧碳责任分摊

首先,利用 Shapley 值法对各个 EH 进行碳排放配额计算。本文的综合能源信息物理系统中共有 3 个 EH,分别称为 EH1、EH2 和 EH3,故 $N = \{EH1, EH2, EH3\}$,全联盟中有 6 个非空子联盟,分别为 $\{EH1\}$, $\{EH2\}$, $\{EH3\}$, $\{EH1, EH2\}$, $\{EH1, EH3\}$, $\{EH2, EH3\}$ 。以 $t=1$ 时刻为例,计算不同子联盟运行时的总碳排放量,如表 4 所示。

以计算 $t=1$ 时刻 EH1 碳排放责任量为例, $E(\{EH1\})$, $E(\{EH1, EH2\} - \{EH2\})$, $E(\{EH1, EH3\} - \{EH3\})$ 和 $E(\{EH1, EH2, EH3\} - \{EH2, EH3\})$

$$c_{CO_2,i,t} = \begin{cases} 0, & \\ 30(E_{CO_2,i,t} - x_{\min}), & \\ 30(x_{\min} - x_{\min}) + 60(E_{CO_2,i,t} - x_{\min}), & \\ 30(x_{\min} - x_{\min}) + 60(x_{\max} - x_{\min}) + 80(E_{CO_2,i,t} - x_{\max}), & \end{cases}$$

基于 Shapley 值法进行碳责任分摊方法可以算出 24 时段各个能量枢纽的碳排放责任成本,并将碳排放责任成本按照阶梯碳价区间进行划分,结果如图 7~图 9 所示。

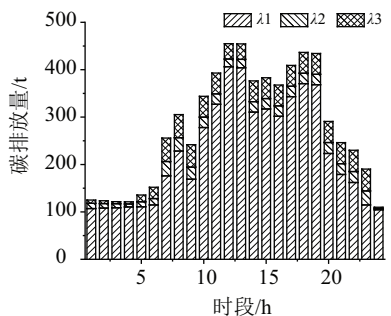


图 7 EH1 碳排放配额区间图

Fig. 7 EH1 carbon emission allowance interval chart

从图 7~图 9 可以看出,EH1 各个时段的碳排放配额均大于 EH2 和 EH3,因为 EH1 的负荷和碳排放量都最大。EH2 和 EH3 碳排放配额相似,其负荷和碳排放量也较小。在 0:00—6:00 时段内各个

表 4 各子联盟运行时的碳排放量

Tab. 4 Carbon emissions from the operation of each sub-consortium

子联盟	系统碳排放量/t
$\{EH1\}$	124.992
$\{EH2\}$	121.664
$\{EH3\}$	121.664
$\{EH1, EH2\}$	243.919
$\{EH1, EH3\}$	243.919
$\{EH2, EH3\}$	240.422
$\{EH1, EH2, EH3\}$	347.512

中,最小值 $x_{\min}$ 为 107.090 t,最大值 $x_{\max}$ 为 124.992 t,得到 EH1 的碳排放责任量在 $[107.090, 124.992]$ 范围之内,平均值 x_{mid} 计算如下:

$$x_{\text{mid}} = P(1) [c(EH1, EH2, EH3) - c(EH2, EH3)] + P(2) [c(EH1, EH2) - c(EH2)] + P(3) \cdot [c(EH1, EH3) - c(EH3)] + P(4)c(EH1) \quad (32)$$

计算得 x_{mid} 为 118.112 t。得到 $t=1$ 时刻 EH1 的碳排放配额区间为 $[107.90, 118.112, 124.992]$,设置阶梯碳交易单价为 30、60、80 元/t。EH1 在 $t=1$ 时刻的阶梯碳责任成本分摊结果如下:

$$\begin{aligned} 0 &\leq E_{CO_2,i,t} \leq 107.090 \\ 107.090 &\leq E_{CO_2,i,t} \leq 118.112 \\ 118.112 &\leq E_{CO_2,i,t} \leq 124.992 \end{aligned} \quad (33)$$

EH 碳排放配额区间位置较低,而 07:00—20:00 时段内各个 EH 碳排放配额区间位置较高。这是因为 EH 中电负荷比例较大,热负荷和气负荷比例较小。其中电负荷主要集中在日间,总碳责任成本走势跟负荷走势相吻合。若用传统的阶梯碳交易模型进行碳排放责任分配,用统一的区间去计算不同时段的碳排放责任成本会存在不公平,而基于 Shapley 值理论的碳交易模型可以更合理的进行碳责任分摊。

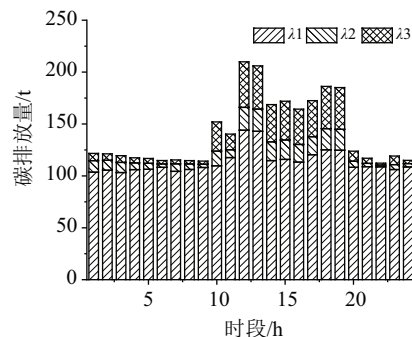


图 8 EH2 碳排放配额区间图

Fig. 8 EH2 carbon emission allowance interval chart

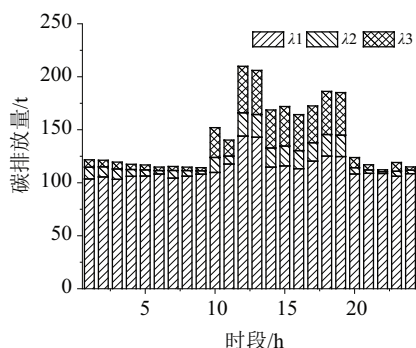


图 9 EH3 碳排放配额区间图

Fig. 9 EH3 carbon emission allowance interval chart

4.3 信息物理故障下综合能源信息物理系统成本评估

三种场景下综合能源系统运行情况运行成本对比如图 10 所示,可见两种故障都会使系统运行成本增加。其中,燃气轮机、燃气锅炉子、热泵和 P2G 设备四个子系统只考虑物理故障时系统运行成本高于只考虑信息故障的运行成本。所有子系统考虑信息物理故障时的运行成本都高于考虑单一故障的运行成本。正常运行时运行成本最低,发生故障之后会导致运行成本增加。其中,燃气轮机的信息和物理故障对运行成本影响最大,燃气锅炉和热泵影响较小,P2G 设备影响最小。

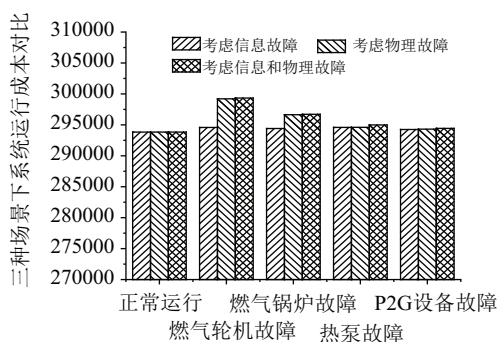


图 10 三种场景下系统运行成本对比

Fig. 10 Comparison of system operating costs in three scenarios

同时考虑信息和物理故障的运行成本稍高于只考虑物理故障时的情况。只考虑物理故障时,该设备故障导致出力为 0,为了保证负荷的正常运行,系统将会把负荷转嫁到其他设备上,改变其运行情况,导致运行成本增加。而同时考虑信息和物理故障时,信息设备故障时能源设备出力不发生调整,仍维持上一时刻的出力情况,较之正常运行经济运行的差别较小,故信息设备故障并不会大幅影响系统经济运行。

各信息物理子系统重要程度指标如图 11 所

示,燃气轮机子系统在综合能源信息物理系统经济运行中的重要程度最大,燃气锅炉和热泵次之,P2G 设备的重要程度最低。这是因为燃气轮机在系统能源转换中起着重要作用,并且在碳排放量计算中也是重要一环。当其出现物理故障时,出力变为 0,则需要更多外购电能,在处于电价峰值时将会导致成本大幅增加;当其出现信息故障时,出力没有及时以经济运行目标调整出力,仍维持上一时刻的出力,也会导致系统无法达到经济运行。

燃气轮机、燃气锅炉子、热泵和 P2G 设备四个子系统只考虑物理故障时系统运行成本高于只考虑信息故障的运行成本。所有子系统考虑信息物理故障时的运行成本都高于考虑单一故障的运行成本。燃气轮机的信息和物理故障对运行成本影响最大,燃气锅炉和热泵影响较小,P2G 设备影响最小。燃气轮机子系统在综合能源信息物理系统经济运行中的重要程度最大,燃气锅炉和热泵次之,P2G 设备的重要程度最低。综合能源信息物理系统中信息设备故障并不会大幅影响系统的经济运行情况。

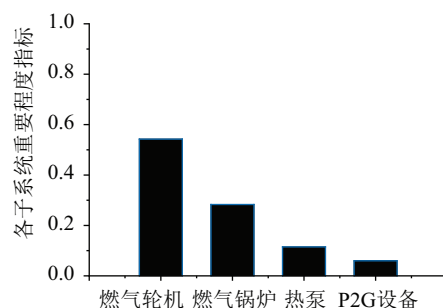


图 11 各信息物理子系统重要程度指标

Fig. 11 Importance indicators for each information physical subsystem

5 结束语

本文利用马尔科夫蒙特卡洛法针对各种故障的概率模型得出设备多时段运行状态模型;将基于 Shapley 值的碳交易模型引入了综合能源信息物理系统,建立了综合能源信息物理系统经济运行模型;为了分析信息物理故障下各子系统对综合能源信息物理系统经济运行产生的影响以及其各自的重要程度,提出了运行成本评估指标。

结果表明,基于 Shapley 值理论的碳交易模型可以根据各 EH 的碳排放量进行碳排放责任分配,碳责任成本走势跟负荷大小相关,可以更合理地进行碳责任分摊。信息和物理故障都会使综合能源信息物理系统运行成本增加,所有子系统考虑信息物理故障时的运行成本都高于考虑单一故障的运行成本。燃气轮机子系统在综合能源信息物理系

统经济运行中的重要程度最大,燃气锅炉和热泵次之,P2G设备的重要程度最低。综合能源信息物理系统中信息设备故障并不会大幅影响系统的经济运行情况。

本文对信息故障做出了相应的假设,在之后的研究中,需要更深入地对各种故障具体分析,更全面地对考虑碳交易和信息设备故障的综合能源系统进行分析研究。

参 考 文 献

- [1] 《新时代的中国能源发展》[EB/OL]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2020n/202207/t20220704_130663.html
The State Council Information Office of the People's Republic of China. Energy in China's New Era[EB/OL]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2020n/202207/t20220704_130663.html
- [2] 赵莎莎, 朱雅魁, 王悦. 基于大数据分析的综合能源系统负荷特性聚类分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 10-15, 52.
ZHAO Shasha, ZHU Yakui, WANG Yue. Cluster analysis of integrated energy system load characteristics based on big data analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 10-15, 52.
- [3] 张娜, 王欢, 宋坤, 等. 基于多能源需求响应的综合能源系统动态优化控制研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 16-24.
ZHANG Na, WANG Huan, SONG Kun, et al. Study on dynamic optimal control of integrated energy system based on multi-energy demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 16-24.
- [4] 亢猛, 钟祎勃, 石鑫, 等. 计及负荷供给可靠性的园区综合能源系统两阶段优化方法研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 25-35.
KANG Meng, ZHONG Yiqing, SHI Xin, et al. Research on two-stage optimization approach of community integrated energy system considering load supply reliability[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 25-35.
- [5] 金璐, 何伟, 闫华光, 等. 基于改进 TOPSIS 的乡镇综合能源系统效益综合评价方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 1-9.
JIN Lu, HE Wei, YAN Huaguang, et al. Comprehensive evaluation method for benefits of township integrated energy system based on improved TOPSIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 1-9.
- [6] 蒋燕, 李秀峰, 高道春, 等. 面向区域综合能源系统的电-气负荷联合预测研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 154-158.
JIANG Yan, LI Xiufeng, GAO Daochun, et al. Research on combined forecasting of electricity-gas load for regional integrated energy system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 154-158.
- [7] 王静, 徐箭, 廖思阳, 等. 计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 2-9.
WANG Jing, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated electrical-gas energy system considering uncertainty of renewable energy output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 2-9.
- [8] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of intergrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [9] 李崎勇, 郑一飞, 刘斌, 等. 基于主从博弈的含碳捕集与热电联产综合能源系统优化运行[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 10-19.
LI Jiyong, ZHENG Yifei, LIU Bin, et al. Optimal operation of an integrated energy system with carbon capture system and combined heating and power based on a master-slave game[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 10-19.
- [10] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.
GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system cyber-physical modeling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [11] LI M, XUE Y, NI M, et al. Modeling and hybrid calculation architecture for cyber physical power systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 138251-138263.
- [12] 何瑞文, 龙隆, 张宝仁, 等. 电力信息物理系统中信息物理化的建模及分析方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14 [2022-09-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220909.1500.002.html>
HE Ruiwen, LONG Long, ZHANG Baoren, et al. Cyber system physicalizing modeling and analysis method in cyber-physical power system[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14 [2022-09-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220909.1500.002.html>
- [13] 俞斌, 郭创新, 王越, 等. 考虑信息系统作用的电力系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 7-13.
YU Bin, GUO Chuangxin, WANG Yue, et al. Research on the reliability of the power system considering impacts of the information systems[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 7-13.
- [14] 范宏, 王宏祥, 张树卿. 综合能源信息物理系统的分层建模和能量-信息流混合计算方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3028-3039.

- FAN Hong, WANG Hongxiang, ZHANG Shuqing. Hierarchical modeling and energy-informationflow hybrid calculation of integrated energy cyber physical systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3028-3039.
- [15] 卫志农, 向育鹏, 孙国强, 等. 计及碳排放含有碳捕集电厂电网的多目标动态最优潮流[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 11-17.
- WEI Zhinong, XIANG Yupeng, SUN Guoqiang, et al. Carbon emission-considered multi-objective dynamic optimal power flow of powersystem containing carbon-capture plant[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 11-17.
- [16] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电一气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
- WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.
- [17] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.
- QU Kaiping, HUANG Linni, YU Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy system with carbon trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707.
- [18] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.
- [19] 刘哲远, 邢海军, 程浩忠, 等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 169-178.
- LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 169-178.
- [20] ZENG J, WANG Q, LIU J, et al. A potential game approach to distributed operational optimization for microgrid energy management with renewable energy and demand response[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4479-4489.
- [21] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 9-15.
- SHI Wenhui, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Applications of Markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15.
- [22] 李谦. 计及极端天气与风电接入的系统运行风险评估[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- LI Qian. Risk assessment of power system with extreme weather and wind power integration[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [23] 刘念, 赵璟, 王杰, 等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1903-1910.
- LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903-1910.
- [24] YOHANANDHAN R V, ELAVARASAN R M, MANOHARAN P, et al. Cyber-physical power system (CPPS): A review on modeling, simulation, and analysis with cyber security applications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 151019-151064.
- [25] 王云, 刘东, 陆一鸣. 电网信息物理系统的混合系统建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1464-1470.
- WANG Yun, LIU Dong, LU Yiming. Research on hybrid system modeling method of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1464-1470.
- [26] 秦婷. 基于碳交易机制的综合能源系统最优经济调度[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- QIN Ting. Carbon trading based optimal economic dispatching for integrated energy system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [27] 刘文霞, 宫琦, 郭经, 等. 基于混合通信网的主动配电信息物理系统可靠性评价[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1706-1718, 1907.
- LIU Wenxia, GONG Qi, GUO Jing, et al. Reliability simulation of adn cyber-physical system based on hybrid communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1706-1718, 1907.

作者简介:



郑焕坤(1980—),男,博士,讲师,研究方向为电力系统分析与控制,综合能源系统。
Email: zhenghuankun@126.com

李钰静(1998—),女,通信作者,硕士研究生,研究方向为综合能源系统、能源互联网。Email: 15835115725@163.com

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-09-20

(杜景飞 编发)