

# 基于信息—物理模型的多能源 路由器多目标优化

柳梦琳, 马大中, 孙秋野

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 针对能源路由器的多时间尺度问题, 考虑能源路由器在优化时信息物理交互的影响, 建立了基于信息物理系统的能源路由器模型并设计了计及多时间尺度能源的多能源路由器优化调度方法。首先考虑能源路由器信息和物理因素的关系建立其物理信息模型, 该模型能够准确反映各约束变量之间的关系, 为后续优化决策提供依据。然后基于奇异系统理论, 提出了一种垂直结构的多时间尺度能源路由器数据分析方法, 该方法可有效消除数据时间尺度差异性所带来的影响。进而针对互联的能源路由器提出了基于多智能体粒子群算法的分布式能源路由器多目标优化方法。最后通过仿真验证了所提出方法的有效性。

**关键词:** 能源路由器; 多时间尺度性; 信息物理模型; 粒子群优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.004 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2021)01-0032-10

## Multi-objective optimization of multi-energy router based on a cyber physical model

LIU Menglin, MA Dazhong, SUN Qiuye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, 110004, China)

**Abstract:** For the multiple time scale problem of energy routers, the impact of cyber physics interaction is considered and the energy router modeling based on cyber physics system is established. Then, an optimization scheduling method of energy router with multi-energies is proposed based on the multiple time scale in this paper. Firstly, the cyber physics modeling of the energy router is established according to the relationship between cyber and physical factors. This model could reflect the relationships between individual constraint variables accurately, and provide the optimization decision basis. Secondly, a vertical structure data analysis method with the multiple time scale for the energy router is proposed by singular system theory. The method could effectively eliminate the influence of the time scale difference of data. In addition, a multi-objective optimization method for distributed energy routers based on multi-agent particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed for interconnected energy routers. Eventually, the simulation results can verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** energy hub; multiple time scale; cyber physical model; particle swarm optimization

目前,飞速发展的可再生能源技术正在缓解人类对化石能源的依赖,如何有效地利用这些可再生能源,在高渗透率条件下保持能源供给的稳定性与可靠性是研究者不得不面临的问题<sup>[1-3]</sup>。Jeremy Rifkin 在第 3 次工业革命一书中指出将能源的生产、制造、存储、运输实现互联网化,是解决能源危机最行之有效的办法<sup>[4]</sup>。能源互联网是未来能源基础平台,分布式能源生产消费的主要组成部分。能源互联网可以整合不同地区的能源并进行统一分配、管理和调度,实现能源的最优分配,将现今集中式的能源结构变为分层扁平化结构<sup>[5]</sup>。为了实现能源的自由传输、多种形式能源之间的转换以及满足特定目标的能源规划,一些设备级的前沿技术是必不可少的,如能源路由器<sup>[6]</sup>。

2007 年苏黎世联邦理工学院在“未来能源网络愿景”项目中第一次提出了能源路由器(energy hub, EH)的概念,它可以实现风能、光能、电能、气等多种能源的输入,还可以实现电、气、热等多种产品的输出,从而协同优化不同形式能源应用于生产、传输、消费等多个环节。由能量路由器的输入和输出功率、能量分配和转换效率,建立能量路由器的模型<sup>[7]</sup>。在此基础上,文献[8]通过对储能装置建模来完善能量路由器的模型。为了完成反向潮流的研究,文献[9]考虑了新能源的并网问题。文献[10]认识到消费终端可以经过短期调节自身负荷,从而达到与安置储能装置类似的效果,并将此调节效应称为“需求响应”进行相应的建模研究。

基于上述的模型,能源路由器的优化运行开始被许多的学者研究。文献[11]用基于 Lyapunov 优化方法构造储能虚拟队列,将能量管理问题中时间耦合储能约束转化为队列稳定性问题,用于含能量路由器的能源集线器。文献[12]考虑新能源和需求响应,研究能量枢纽短期经济调度。文献[13]则综合考虑了 CHP、储能、新能源、需求响应的能量枢纽模型,进行运行优化。针对多能源系统中能源实时价格、负荷波动等的不确定性,文献[14]利用鲁棒优化方法将这些不确定因素纳入考虑进行求解,从最

小运行成本的角度进行了优化。文献[15]对多个分布式能源系统之间的互联以及电/热/冷多能流进行协调优化运行。但是上述的优化都是针对于单一能源路由器的优化运行的,主要是根据某一能量枢纽内的设备配置及系统约束决定各时段的能源/能量输入功率,其主要以电、气、热为主,达到运行成本最低、碳排放量最小等目标。

在能源互联网的运行中,单一的能源路由器的优化只能是基于局部最优的目标来进行。而之所以把多地区和多种形式的能源以互联网方式来运行的目的就是要综合考虑不同区域之间的相互联系,做到全局最优。文献[16]通过多智能体遗传算法将多能源路由器的最优潮流问题通过多智能体遗传算法转化成为传统的最优潮流问题。文献[17]在考虑了能源的效率、可靠性等指标的条件下针对于包含有电、气和热的多个能源路由器设计一种长期的最优发展计划。文献[18]采用混合整数线性规划的方法计算多能源路由器的最优潮流。文献[19]提出了智能能源路由器的概念,并针对于多个互联的能源路由器,将整合的需求侧管理优化转化成非合作规划问题并给出其存在 Nash 平衡点所存在的条件,进而在文献[20]中为保证多个能源路由器之间的通讯,提出了一种基于云计算的通讯结构。

但是上述无论是单个能源路由器的优化问题还是多个能源路由器的优化问题,所提出的优化方法都存在着如下问题。

1)在优化过程中假设所有的数据都是处于同一时间断面。在能源路由器中,大量存在的可再生能源设备与传统能源设备,其优化控制周期不同,这使得能源路由器表现出更强的多时间尺度性。如果优化方法以快速变化的对象的时间为基准,则优化方法的计算量会大大增加。而如果以缓慢变化的对象的时间为基准,则无法有效处理快速变化的对象变量。

2)所建立的模型往往只考虑能源路由器的输入和输出的关系,然后根据设定的目标对其中的分配系数进行优化计算。仅仅考虑分配系数的优化方法只是对设备之间物理分配关系进行的优化,未考虑

能源路由器信息物理交互所带来的影响。

综上所述,在考虑能源路由器中信息与物理系统的特性下,建立基于信息物理系统的能源路由器模型并给出其计及多时间尺度能源的优化分配方法。所建立的模型主要包括3个部分:基于多智能体技术的信息层;基于耦合矩阵的物理层;负责信息和物理交互的通信层。针对互联的分布式能源路由器,基于所提出的信息物理模型提出了其优化方法,该文的创新点如下。

①针对能源路由器中接入的多种能源所呈现出的能源数据的多尺度特性,基于奇异系统理论,提出多时间尺度数据的分析方法。该方法可以消除数据差异性带来的影响。

②建立能源路由器的信息物理模型,该模型充分地考虑了能源路由器中信息因素和物理因素之间的关系,更准确地反应各个约束变量之间的关系,为后续的优化决策提供依据。

③针对多个互联的能源路由器,提出基于多智能体粒子群算法的分布式能源路由器的优化方法,其优化目标既考虑了燃料的花费成本和用户侧的经济效益,又考虑了环境效益,可以在各个优化目标之间作动态的平衡。

## 1 基于信息物理系统的能源路由器建模

能源路由器信息物理系统模型主要包括信息层模型、物理层模型和负责物理信息交互的通信层。能源路由器的信息物理系统模型主要是根据用户需求研究多目标条件下的能源优化分配问题,因此信息物理交互的通信层就采用传统的通信形式。能源路由器的信息层是能量管理系统,是能源路由器的中枢,负责收集通过通信网络传递上来的各种信息,进行综合分析并决策,控制底层的物理设备达到能源的优化分配,其主要功能包括调度优化、信息预测、数据存储和人机交互。物理层主要包括输入接口层、能量传输线、能量转换器(CHP)以及能量存储设备。

### 1.1 基于多智能体技术的能源路由器信息层设计

采用多智能体技术对能源路由器中的信息层进行设计。首先将能源路由器的信息层分为中心控制 Agent、输入端管理 Agent、设备管理 Agent 和负荷管理 Agent,各 Agent 的关系和功能如图 1 所示。

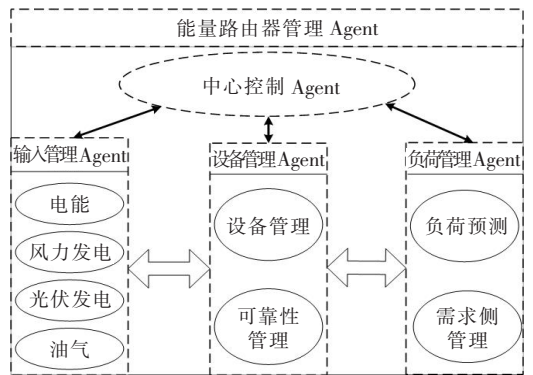


图 1 基于多智能体的能源路由器建模

Figure 1 Information layer model of energy hub based on multi-agent

中心控制 Agent 是能源路由器信息层的核心,负责根据负荷、风能、太阳能、设备参数和可靠性指标来优化输入端,优化目标可以根据系统运行的需要设置为单一目标或者是多目标。

输入端管理 Agent 主要研究对能源输入功率的调度问题、传输的稳定性问题以及风速/日照强度的预测和功率计算等。

设备管理 Agent 主要包含对输入接口层进行能量调度以及保证能源路由器的稳定运行。

负荷管理 Agent 包括基于预测模型对用户负荷量进行预测,进而由中心 Agent 进行控制调度;通过对可中断负荷的控制,有效地调控负荷特性以可靠地运行能源路由器。

### 1.2 基于耦合矩阵的能源路由器物理层设计

多输入多输出能源路由器物理层如图 2 所示。图中  $P$  表示输入功率; $L$  表示输出功率; $C$  表示耦合矩阵,且某个输入功率和输出功率之间的转换效率由内部的耦合系数代表。能源路由器物理层的输出与输入可以表示<sup>[6]</sup>为

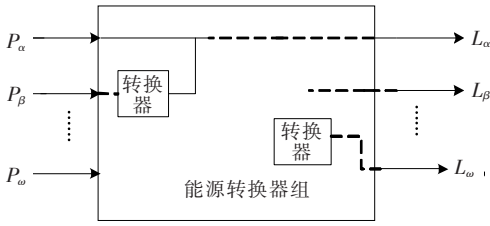


图 2 多输入多输出能源路由器物理层

Figure 2 Physical layer model of Energy Hub with multiple input and output ports

$$\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \cdots & c_{\omega\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \cdots & c_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\omega} & c_{\beta\omega} & \cdots & c_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

当输入功率  $P_i$  需要作为能源路由器的多个输出能源的输入能源时,设置调度参数  $\nu_{ij}$  表示输入功率  $P_i$  用于转换成能源  $j$  的百分比:

$$L_j = \nu_{ij} P_i \quad (2)$$

其中,  $i = \alpha, \dots, \omega$ ;  $j = \alpha, \dots, \omega$ 。

调度参数  $\nu_{ij}$  满足的约束条件:

$$0 \leq \nu_{ij} \leq 1, \sum_j \nu_{ij} = 1 \quad (3)$$

即分配到用于转换成能源  $j$  的能量应该小于或者等于能源  $i$  的能量且分配到能源  $j$  的能量之和等于能源  $i$  的总能量。

因此在对耦合矩阵  $C$  建模时,需要考虑各转换器的转换效率和输入端口各能量的比例分配:

$$C = \eta \times \nu = \begin{bmatrix} \eta_{\alpha\alpha} & \eta_{\beta\alpha} & \cdots & \eta_{\omega\alpha} \\ \eta_{\alpha\beta} & \eta_{\beta\beta} & \cdots & \eta_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{\alpha\omega} & \eta_{\beta\omega} & \cdots & \eta_{\omega\omega} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu_{\alpha\alpha} & \nu_{\beta\alpha} & \cdots & \nu_{\omega\alpha} \\ \nu_{\alpha\beta} & \nu_{\beta\beta} & \cdots & \nu_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \nu_{\alpha\omega} & \nu_{\beta\omega} & \cdots & \nu_{\omega\omega} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $\eta$  表示转换效率,  $\nu$  表示调度参数。

能量路由器的存储单元模型<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} M_\alpha \\ M_\beta \\ \vdots \\ M_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{\alpha\alpha} & s_{\beta\alpha} & \cdots & s_{\omega\alpha} \\ s_{\alpha\beta} & s_{\beta\beta} & \cdots & s_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{\alpha\omega} & s_{\beta\omega} & \cdots & s_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_\alpha \\ \dot{E}_\beta \\ \vdots \\ \dot{E}_\omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $M$  表示存储单元的输出功率;  $S$  表示存储转换矩阵;  $\dot{E}$  表示存储能量。反映的是储能单元对系统潮流的影响。

综上所述,基于耦合矩阵的能量路由器物理层模型为

$$L = CP - \dot{SE} \quad (6)$$

式(6)反映了负荷、输入功率与存储能量之间的关系。

### 1.3 基于多时间尺度的能源路由器多目标优化

能源路由器的控制结构分为 3 层,包括中心控制层、优化调度层和控制执行层,如图 3 所示。中心控制层主要负责与外部能源网络通信,传递内部能源网络的物理状态以及内外能源网络交互所需要的控制信号等信息状态流,并向优化调度层传递能源信息。控制执行层根据优化调度层所给出的系统控制参数对包括电池、存储单元、分配参数进行控制。优化调度层所起的作用是承上启下,首先基于设定的优化目标并根据中心控制层所传递的内外能源信息进行优化计算,产生能源路由器的运行配置参数。在优化过程中,由于能源路由器的输入/输出参数中能源的时间尺度不一致,因此基于奇异扰动理论,提出了能源路由器的多时间尺度分析方法。

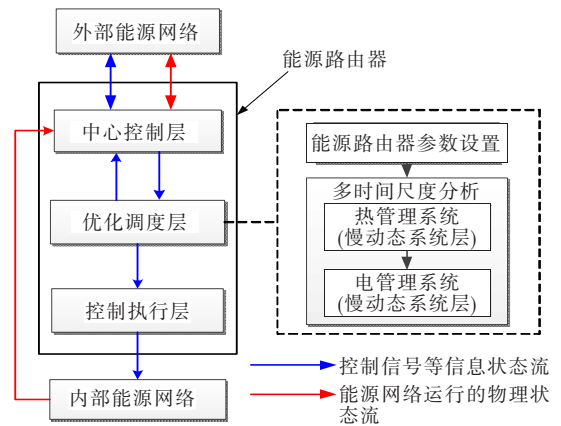


图 3 能源路由器的分层控制结构

Figure 3 Hierarchical structure of energy hub management

首先建立能源路由器的状态方程,能源路由器的输出主要考虑电能和热能,建立如下的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_h = h(x \ y \ u) \\ \epsilon_e \dot{x}_e = e(x \ y \ u) \\ 0 = EH(x \ y \ u) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $x$  表示系统的状态变量, 包含 2 个部分  $x_h$  和  $x_e$ ;  $x_h$  是与热相关的慢响应状态变量,  $x_e$  是与电相关的快响应状态变量;  $u$  表示控制输入信号, 为各个需要调节量的参考值;  $y$  表示系统电压、电气负荷和热负荷等参数;  $h(\cdot)$  和  $e(\cdot)$  分别表示热系统状态和电系统状态的动态特性;  $EH(\cdot)$  表示能源路由器的平衡方程。根据奇异扰动系统理论, 根据不同的时间尺度, 式(7)可以被分解为慢响应系统与快响应系统。慢反应系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_h = h(x \ y \ u) \\ 0 = e(x \ y \ u) \\ 0 = EH(x \ y \ u) \end{cases} \quad (8)$$

针对快反应系统, 设  $\eta_e = t/\epsilon_e$ , 在新的时间尺度下  $x_h$  可以被看做是常数, 因此快反应系统可以写成如下形式:

$$\begin{cases} x_h = C \\ dx_e/\eta_e = e(x \ y \ u) \\ 0 = EH(x \ y \ u) \end{cases} \quad (9)$$

在图 3 中, 虚线内部为能源路由器的多尺度分解优化调度层, 该层与其它层之间只是表征系统运行情况的信息状态。

## 2 能源路由器的优化目标及约束条件

### 2.1 分布式能源路由器网络的优化目标函数

互联的分布式能源路由器的优化目标既应考虑供给侧的需求, 还应考虑用户侧的需求。因此, 在优化时, 不仅考虑环境效益的影响, 并且将燃料以及用户的花费成本加入到能源路由器的优化模型中, 从而建立多目标混合调度模型。基于电力网络混合调度模型的优化目标可以表述为

$$\begin{cases} \text{Min}(NTC + TC) \\ NTC = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(P_{G_i}(t)) + \sum_{i=1}^T f(P_{gtotal}(t)) \\ TC = \sum_{i=1}^T \alpha_e(t)P_e(t) + \alpha_g P_g(t) + SC(t) + PC^{gas} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $NTC$  表示燃料花费的总成本;  $N$  表示发电机数量;  $f_i(P_{G_i}(t))$  表示第  $i$  个发电机组在  $t$  时刻内的费用特性曲线;  $f(P_{gtotal}(t))$  表示天然气费用特性曲线;  $TC$  表示用户总花费成本;  $\alpha_e(t)$  表示实

时电价;  $\alpha_g$  表示天然气价格, 为一常数, 不考虑天然气的实时变化;  $SC(t)$  表示存储单元的花费成本,  $PC^{gas}$  表示处理污染气体成本。碳排放被转化成处理污染气体的成本并放置到用户侧进行成本核算, 而没有对能源消耗侧进行碳排放的评估。

### 2.2 能源路由器的约束条件

能量路由器信息层中提出的各个 Agent 的约束条件如下所述。

电能 Agent 考虑变压器的效率、系统稳定性和电网输出功率的范围, 约束条件:

$$\begin{cases} L_e^{net}(t) = P^{net} \eta_{ee}^T P_e(t) \\ P_e^{min}(t) \leq P_e(t) \leq P_e^{max}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $L_e^{net}(t)$  表示公共电网输出的电负荷功率;  $P^{net}$  代表输电系统稳定时的概率;  $\eta_{ee}^T$  表示变压器的转换效率;  $P_e^{max}(t)$  和  $P_e^{min}(t)$  分别表示公共电网输入电功率的最大值和最小值。

风力/光伏发电 Agent 考虑机组的稳定性、AC/AC(DC/AC)转换器的效率和输出功率范围, 约束条件:

$$\begin{cases} L_e(t) = P \eta_{we}^{con} P_w(t) \\ P_w^{min}(t) \leq P_w(t) \leq P_w^{max}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中  $L_e(t)$  表示风力/光伏发电输出的电负荷功率;  $P$  表示风力/光伏机组稳定性概率;  $\eta_{we}^{con}$  表示 AC/AC(DC/AC)转换器的效率;  $P_w^{min}(t)$  和  $P_w^{max}(t)$  分别表示风力/光伏发电输入电功率的最小值和最大值。

加热装置 Agent 忽略了最大热功率输出, 将设备运行的稳定性和石油、热转换效率考虑其中, 约束条件:

$$\begin{cases} [L_h^{GF}(t) = P^F \eta_{gh}^F \nu_{gF}(t) P_g(t) \\ 0 \leq \nu_{gF}(t) \leq 1 \\ \nu_{gchp}(t) + \nu_{gF}(t) = 1 \\ [L_h^{OF}(t) = p^F \eta_{oh}^F P_o^F(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中  $L_h^{GF}(t)$  表示装置输出热负荷功率;  $P^F$  表示装置稳定时的概率;  $\eta_{gh}^F$  表示装置的转换效率;  $P^{chp}$  表示装置允许输出热功率的最大值;  $\nu_{gchp}(t)$  和  $\nu_{gF}(t)$  表示天然气调度参数;  $L_h^{OF}(t)$  表示装置输出热负荷功率;  $p^F$  表示装置稳定性概率;  $\eta_{oh}^F$  表示装置的效率。

石油 Agent 忽略了功率损耗, 将石油输入功率范围和传输稳定性考虑在其中, 约束条件:

$$\begin{cases} [L_{\text{Trans}}(t) = P^{\text{Trans}} \nu_{\text{os}}(t) P_o(t) \\ P_o^{\min}(t) \leq P_o(t) \leq P_o^{\max}(t) \\ 0 \leq \nu_{\text{os}}(t) \leq 1 \\ \nu_{\text{of}}(t) + \nu_{\text{os}}(t) = 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $L_{\text{Trans}}(t)$  表示交通负荷功率;  $P_o^{\min}(t)$  和  $P_o^{\max}(t)$  分别表示石油输入功率的最小值和最大值;  $\nu_{\text{os}}(t)$  表示石油调度参数;  $P^{\text{Trans}}$  表示输油管线稳定时的概率。

存储单元 Agent 主要分为两类:电存储单元和热存储单元。电能和热能存储单元的约束主要包括电热功率平衡约束、电热存储容量控制、充放电和热单元的约束,具体如下所示:

$$\begin{cases} [P_i^s(t) = P_i^s(t-1) + P_i^{\text{ch}}(t) - P_i^{\text{dis}}(t) \\ \phi_i^{\min} P_i^M \leq P_i^s(t) \leq \phi_i^{\max} P_i^M \\ \phi_i^{\min} \frac{1}{\eta_i^{\text{ch}}} P_i^M S_i^{\text{ch}}(t) \leq P_i^{\text{ch}}(t) \leq \phi_i^{\max} \frac{1}{\eta_i^{\text{ch}}} P_i^M S_i^{\text{ch}}(t) \\ \phi_i^{\min} \eta_i^{\text{dis}} P_i^M S_i^{\text{dis}}(t) \leq P_i^{\text{dis}}(t) \leq \phi_i^{\max} \eta_i^{\text{dis}} P_i^M S_i^{\text{dis}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中  $P_i^s(t)$  表示  $t$  时刻电(热)存储功率;  $P_i^{\text{ch}}(t)$  表示  $t$  时刻充电(热)功率;  $P_i^{\text{dis}}(t)$  表示  $t$  时刻放电(热)功率;  $P_i^M$  表示电(热)能存储单元可以存储的最大功率;  $\phi_i^{\min}$  和  $\phi_i^{\max}$  分别表示最小和最大电(热)能存储率;  $\eta_i^{\text{ch}}$  和  $\eta_i^{\text{dis}}$  表示充放电(热)时的效率  $S_i^{\text{ch}}(t)$  和  $S_i^{\text{dis}}(t)$  分别表示充放电(热)时的状态;  $i$  为 e 时表示与电存储单元相关,  $i$  为 h 时表示与热存储单元相关( $i$  为储存单元状态表征)。

负荷平衡 Agent 根据能量路由器的输入能量建立等式,即单元输出功率之和为电负荷功率与热负荷功率,即

$$\begin{cases} [L_e(t) = L_e^{\text{net}}(t) + L_e^{\text{wind}}(t) + L_e^{\text{solar}}(t) + \\ \{L_e^{\text{chp}}(t) + P_e^{\text{dis}}(t) - P_e^{\text{ch}}(t) \\ [L_h(t) = L_h^{\text{GF}}(t) + L_h^{\text{chp}}(t) + P_h^{\text{dis}}(t) - P_h^{\text{ch}}(t) \end{cases} \quad (16)$$

### 3 基于多智能体粒子群算法分布式能源路由器的优化

按照 1.2 中的定义,把每一个能源路由器看做是一个智能体,则互联的分布式能源路由器智能体(EHMA)可以被看做是具有多信息输入输出与多物理量输入输出的智能体,如图 4 所示。用平面网

络表示互联能源路由器之间的连接关系,能源路由器之间同时存在实线和虚线连接的时候表示 2 个能源路由器之间既有物理的交互影响又有信息之间的相互传递。如果只有虚线表示能源路由器之间只有信息的交互而没有物理的相互影响。为实现分布式一致算法,要求多能源路由器之间的连接形式满足强连通的条件。

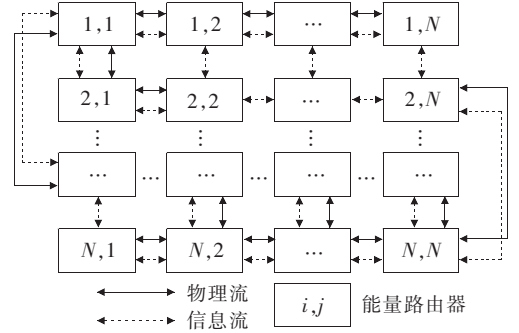


图 4 互联的能源路由器多智能体网络

Figure 4 Interconnected multi-agent networks of energy hub

假设智能体  $(i, j)$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $j=1, 2, \dots, N$  包含该模型的一组解向量,为了求解目标函数的最小值,使该组解向量目标函数值的相反数为能量值,即

$$\text{Energy}(i, j) = -f(i, j) \quad (17)$$

在智能体系统中,每个智能体只能与邻接智能体进行信息交换,展开合作或竞争,从而获取更多的资源,维持系统的稳定。

1) 建立多能源路由器智能体系统网络,确定其中所需的参数值。

$T$  为迭代次数;  $P$  为多智能体之间相互合作或竞争的概率;  $M$  为自学习网络;  $R$  为搜索半径;  $\delta$  为进化的次数;  $P_m$  为变异的概率;  $\Gamma_{\max}$  和  $\Gamma_{\min}$  分别代表惯性权重系数的最大和最小值;  $\phi_1^{\text{ini}}$  和  $\phi_1^{\text{fin}}$  分别代表社会学习因子的开始和最终值;  $\phi_2^{\text{ini}}$  和  $\phi_2^{\text{fin}}$  为自学习因子的开始和最终值。

2) 得到速度向量的最小和最大值,并且建立局域智能体系统。

首先需要初始化智能体的速度向量和解坐标向量以及最优极值和全系统的最佳极值,然后用坐标取余法来建立局域智能体系统。

3) 通过建立的局域系统间的相互交流来更新每

个智能体的最优极值和全系统的最佳极值。

4) 在速度和解向量约束的范围内, 智能体更新后的速度向量和解坐标向量:

$$\mathbf{v}_{ij}^{k+1} = \Gamma \mathbf{v}_{ij}^k + d_1 R_1 (p_{ij} - \mathbf{x}_{ij}^k) + d_2 R_2 (p_{gj} - \mathbf{x}_{ij}^k) \quad (18)$$

$$\mathbf{x}_{ij}^{k+1} = \mathbf{x}_{ij}^k + \mathbf{v}_{ij}^{k+1}, j = 1, \dots, n \quad (19)$$

式中  $k$  表示对该种群学习的次数;  $R_1$ 、 $R_2$  表示在  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数;  $d_1$  表示自身认知系数;  $d_2$  表示粒子对群体认知的系数, 相应的公式:

$$\begin{cases} d_1 = d_1^{\text{ini}} + \frac{d_1^{\text{fin}} - d_1^{\text{ini}}}{T_{\text{max}}} \cdot T \\ d_2 = d_2^{\text{ini}} + \frac{d_2^{\text{fin}} - d_2^{\text{ini}}}{T_{\text{max}}} \cdot T \end{cases}$$

$$\Gamma = \begin{cases} \Gamma_{\text{min}} + \frac{(\Gamma_{\text{max}} - \Gamma_{\text{min}}) \times (h - h_{\text{min}})}{h_{\text{avg}} - h_{\text{min}}}, & h \leq h_{\text{avg}} \\ \Gamma_{\text{max}}, & h > h_{\text{avg}} \end{cases}$$

式中  $h$ 、 $h_{\text{avg}}$ 、 $h_{\text{min}}$  分别表示粒子的目标函数值、均值以及最小值。

5) 计算智能体的能量值, 然后通过自学习含有系统最佳极值的智能体, 从而更新全系统的最佳极值。

6) 如果没有达到迭代次数的最大值, 则跳回步骤 3; 反之计算结束, 得到最优解。

## 4 仿真

为了验证所提算法的有效性, 该文选择基于 IEEE 39 的节点多能量路由器系统, 其中的线路参数使用原始数据。从图 5 可以看出, 该系统含有 46 条支路、10 个发电机节点 (30~39 节点) 和 21 个负荷节点。另外, 节点 1、9、12、31 用来建立光伏或者风力发电站。

系统中所使用的实时电价和节点负荷数据如图 6 和图 7 所示。

多智能体系统中 1~10 号节点发电机参数如表 1 所示。

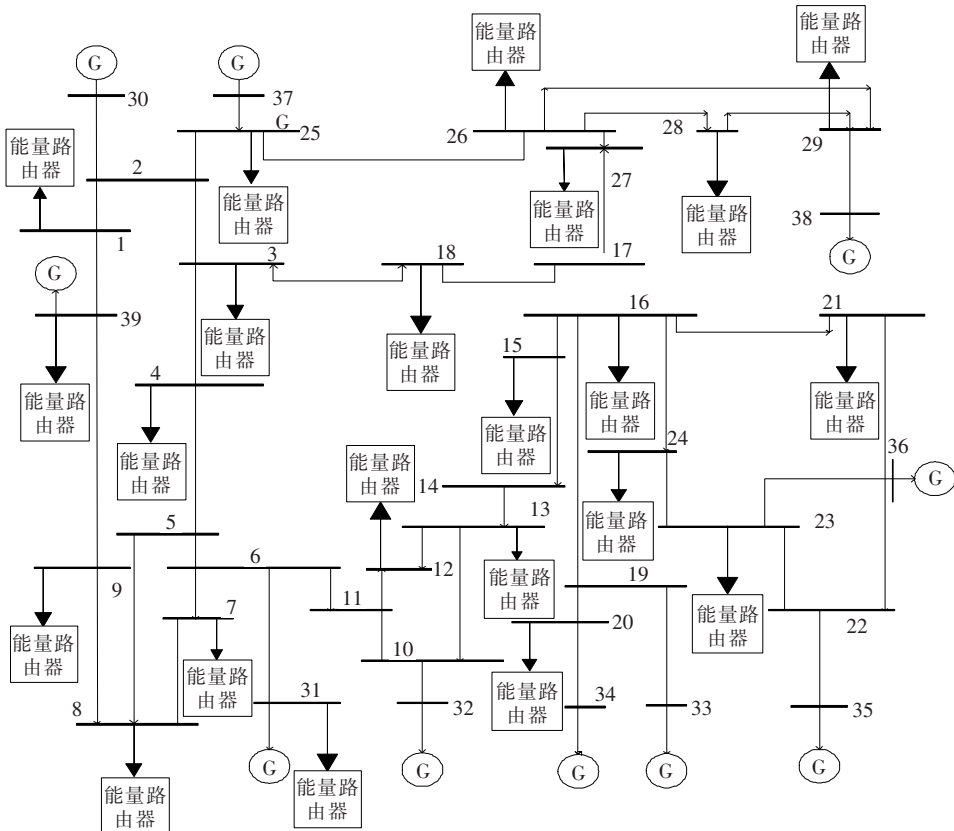


图 5 基于 IEEE 39 的多能量路由器系统结构

Figure 5 Multiple energy hub system based on IEEE 39

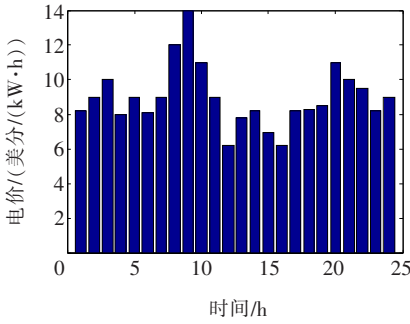


图 6 实时电价

Figure 6 Real-time pricing

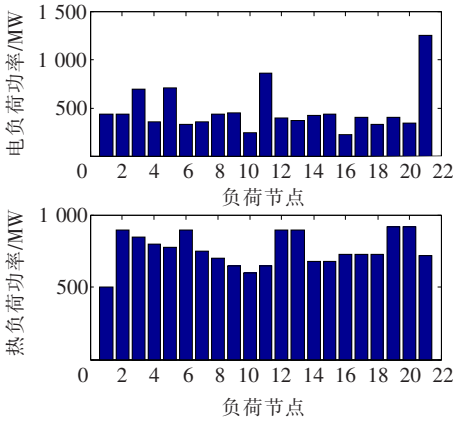


图 7 IEEE 39 节点负荷数据

Figure 7 Load data of IEEE 39

表 1 IEEE 39 发电机参数

Table 1 Parameters of generators of IEEE 39

发电机编号	$P_{min}$	$P_{max}$	$a$	$b$	$c/h$
1	350	1 040	0.004 21	12.5	913.4
2	150	680	0.006 90	6.73	94.70
3	180	725	0.020 28	7.07	309.5
4	150	660	0.011 40	5.35	148.8
5	100	508	0.003 57	8.03	287.7
6	200	700	0.004 92	6.99	391.9
7	145	580	0.005 73	6.6	455.7
8	120	564	0.006 05	12.9	722.8
9	260	865	0.005 15	12.9	635.2
10	300	1 100	0.005 69	12.8	654.6

中心控制 Agent 采用所提的算法优化,将给出相应的参数设置。 $L_{size}$  为 10;  $S_{size}$  为 4; 搜索半径  $R$  为 0.2; 迭代次数  $T$  为 600; 智能体之间相互合作或竞争的机率  $P$  为 0.6; 变异概率  $P_m$  为 0.2; 进化次

数  $\delta$  为 10; 惯性权重系数的最大和最小值  $\Gamma_{max}$ 、 $\Gamma_{min}$  分别为 0.9 和 0.4; 社会学习因子开始值和最终值  $\phi_1^{ini}$  和  $\phi_1^{fin}$  分别为 0.5 和 2.5; 自学习因子开始值和最终值  $\phi_2^{ini}$  和  $\phi_2^{fin}$  分别为 2.5 和 0.5; 互联的分布式能源路由器系统燃料花费成本迭代曲线如图 8 所示。

图 9 为各个负荷节点处的调度参数  $\nu_{gchp}$  值。它是在同一时刻采用多智能体粒子群算法迭代出的各个负荷节点的调度参数,其中在第 12 个负荷节点处取得最大值为 0.615 2,在第 7 个负荷节点处取得最小值为 0.222 9。

图 10 为能量路由器输入给公共电网的功率和天然气的功率。首先,由中心 Agent 把每个负荷节点的调度参数  $\nu_{gchp}$  传递其管理 Agent,然后求出每个负荷节点输入端公共电网的输入功率和天然气的输入功率,最后把这些数据传递其输入端管理 Agent 进行调度。

表 2 为采用多智能体粒子群算法求出的各个发电机组的出力大小。

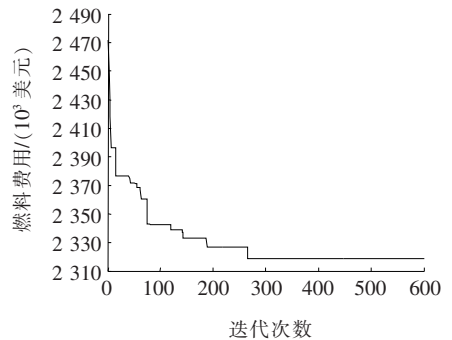


图 8 燃料花费成本

Figure 8 Fuel cost

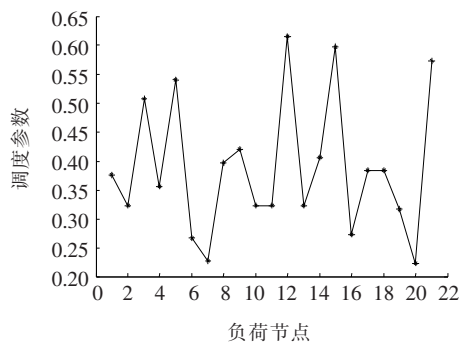


图 9 调度参数  $\nu_{gchp}$

Figure 9 Dispatch factor  $\nu_{gchp}$



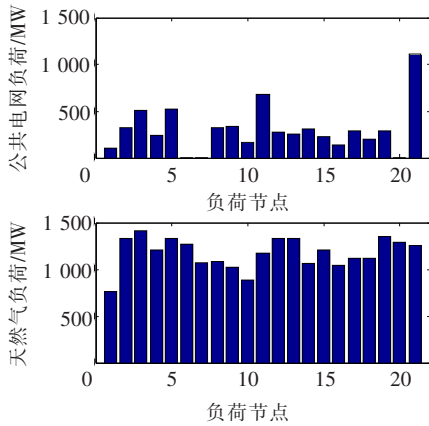


图 10 能量路由器输入功率

Figure 10 Input power of the Energy Hub

表 2 发电机组出力功率值

Table 2 Output power values of the generator

发电机编号	有功功率/MW
30	680.47
31	646.13
32	445.68
33	651.87
34	508.00
35	674.85
36	580.00
37	485.13
38	793.26
39	797.12

## 5 结语

该文设计了基于信息物理系统的能源路由器模型,并提出了多时间尺度能源的优化方法。通过建立考虑信息和物理因素关系的物理信息模型,反映多能源路由器之间的信息和网络拓扑关系,为后续的优化运行提供依据。然后提出了一种基于奇异扰动理论的多时间尺度数据分析方法,有效地解决了多种形式能源数据间时间尺度差异性大的问题。之后针对多个互联的能源路由器设计了基于多智能体粒子群算法的分布式能源路由器的优化方法,可以有效地提高寻优速度和计算精度。最后,通过仿真验证了该文所提出算法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 谈竹奎,程乐峰,史守圆,等. 能源互联网接入设备关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(14):140-152. TAN Zhukui, CHENG Lefeng, SHI Shouyuan, et al. Discussion on key technologies of energy internet access equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(14):140-152.
- [2] 荀挺,雷胜华,丁晓辰,等. 区域综合能源系统的多目标最优潮流算法研究[J]. 智慧电力,2019,47(9):19-28. XUN Ting, LEI Shenghua, DING Xiaochen, et al. Multi-objective optimal power flow algorithms for integrated community energy systems[J]. Smart Power, 2019, 47(9):19-28.
- [3] Su J, Huang W R, Qu X Y, et al. Analysis of energy efficiency evaluation indexes for energy internet[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (IS-PEC), Beijing, China: IEEE, 2019.
- [4] Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York, USA: Palgrave MacMillan, 2011.
- [5] 李秋燕,王利利,张艺涵,等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(19):180-186. LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(19):180-186.
- [6] 任勤让. 五端口能源路由器控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2019,56(23):97-106. REN Qinrang. Control strategy of five port energy router [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56,(23)97-106.
- [7] Geidl M, Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007,22(1):145-155.
- [8] Geidl M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D]. Switzerland: ETH Zurich, 2007.

- [9] Schulze M, Friedrich L, Gautschi M. Modeling and optimization of renewables; Applying the energy hub approach[C]//2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, Singapore; IEEE, 2008.
- [10] Ahčin P, Šikić M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems[C]//2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China; IEEE, 2010.
- [11] 盛万兴,李鹏华,段青,等. 基于 Lyapunov 优化方法的含能量路由器的能源集线器能量管理策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21):6212-6225.  
SHENG Wanxing, LI Penghua, DUAN Qing, et al. Research on energy management of energy hub with energy router based on lyapunov optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21):6212-6225.
- [12] Pazouki S, Haghifam M R, Pazouki S. Short term economical scheduling in an energy hub by renewable and demand response[C]// 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Istanbul, Turkey; IEEE, 2013.
- [13] Pazouki S, Haghifam M R, Olamaei J. Economical scheduling of multi carrier energy systems integrating renewable, energy storage and demand response under energy hub approach[C]//2013 Smart Grid Conference (SGC), Tehran, Iran; IEEE, 2013.
- [14] Parisio A, Del Vecchio C, Velotto G. Robust optimization of operations in energy hub[C]//2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA; IEEE, 2011.
- [15] 郑伟,胡长斌,丁丽,等. 基于多智能体系统微电网分布式控制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3):177-184.  
ZHENG Wei, HU Changbin, DING Li, et al. Research on distributed control of microgrid based on multi-agentsystem[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3):177-184.
- [16] Zhang X P, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5):2302-2311.
- [17] Sheikhi A, Rayati M, Bahrami S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2):675-683.
- [18] Shao C C, Wang X F, Shadidehpour M, et al. An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1):239-248.
- [19] Sheikhi A, Rayati M, Bahrami S, et al. A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64:1007-1016.
- [20] Wasilewski J. Integrated modeling of microgrid for steady-state analysis using modified concept of multicarrier energy hub[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73:891-898.