

DOI: 10.7667/PSPC171237

微能源网信息物理系统模型及其协调控制

刘方泽, 牟龙华, 何楚璇

(同济大学电气工程系, 上海 201804)

摘要: 能源互联网系统对物理与信息协同调控技术要求不断提高, 信息物理融合系统可以很好地解决此类问题。在微能源网和信息物理系统的基础上, 提出了一种微能源网信息物理系统的基本构架。在物理层面, 建立了能源网络模型和能源耦合模型。在信息层面, 将电力系统的统一信息模型扩展到能源领域, 建立起信息系统模型。对有时滞的微能源网信息物理系统, 使用一致性理论对其协调控制, 并进行了仿真验证。仿真结果证明了信息时滞对物理系统运行的影响以及一致性理论对系统协调控制的有效性。

关键词: 微能源网; 信息物理系统; 分布式能源; 信息系统模型; 一致性协调控制

Modeling and control of cyber physical system for micro-energy network

LIU Fangze, MU Longhua, HE Chuxuan

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The requirements of physical and informational coordinated control technology for the energy internet system are constantly improved. Cyber Physical System (CPS) can well solve the problem. Based on previous studies of micro-energy network and CPS, a basic framework of CPS for micro-energy network is presented in this paper. Models of energy network and energy coupling are established at the physical level. Common information model of power system is extended to the energy field and the model of information system is established at the information level. The consensus theory is used to control CPS for micro-energy network which has response delay, and the simulation is done to validate its effectiveness. The simulation results show that the information delay has an effect on the physical system operation, and also prove the validity of the consensus theory on system coordination control.

This work is supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2014CB249201) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 0800219375).

Key words: micro-energy network; cyber physical system (CPS); distributed generation; modeling of information system; consensus control

0 引言

随着能源枯竭、环境污染和气候变化问题的日益突出, 太阳能、风能等可再生分布式能源得到了快速发展, 天然气等清洁能源也因为电转气等技术的成熟而吸引了越来越多的关注^[1-2]。2011年, 杰里米·里夫金首先提出了能源互联网的愿景, 我国原国家电网董事长刘振亚也提出了全球能源互联网的能源战略。能源互联网需要更加智能地协调控制技

术, 信息物理融合系统(Cyber Physical System, CPS)能够很好地解决这个问题。CPS是美国国家科技委员会在2006年提出的, 其通过计算、通信和控制的有机融合与深度协作, 实现信息域和物理域的紧密结合, 近年来, CPS在电力系统和能源领域的应用已经成为国内外研究的热点问题之一。

能源互联网是一种以智能电网为基础, 借用互联网思想, 通过大数据与云计算技术、电力电子技术和信息技术等先进技术, 融合大量分布式能源采集和储存装置, 与天然气网络、供热网络和交通网络等系统紧密耦合, 能够实现能源和信息双向流动的能源网络^[3-5]。CPS是能够实现虚拟信息系统和真实物理层互通互联、协调控制的复杂多维异构智能

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目资助(973项目)(2014CB249201); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(0800219375)

系统, 其强调信息和物理的深度耦合, 具有计算、通信和控制(computation、communication、control, 3C)三个典型特征^[6]。

国内对能源互联网和 CPS 的研究还处于起步阶段。文献[7]在国内最早将电力系统和 CPS 的概念结合到一起, 提出了构建电力 CPS 的框架和思路, 指出了电力 CPS 实现过程中关键技术和主要挑战。文献[8]利用微分代数方程组、随机过程、排队论等数学工具建立了电力 CPS 的稳态与动态模型, 提出电力 CPS 的可靠性和安全性研究方向和多种控制方法相结合的混合控制策略。文献[9]建立了柔性负荷和源储协调控制的混合系统模型, 提出了该模型的优化控制问题。文献[10]将 CPS 系统抽象为包含节点和支路的有向拓扑图, 通过矩阵运算量化计算系统的信息能量流。文献[11]给出了孤岛微网的 CPS 架构, 提出了一种有功功率的实时调度模型和一种一致性分布式协同算法。文献[12]提出一种基于集合论的 CPS 交互建模方法, 剖析了电力能量流与信息流的耦合方式, 并对典型测试系统的案例进行了分析。但上述文献的研究对象仅为传统电网而不是能源领域。文献[13]提出一种基于信息物理融合的能源互联网模型, 并结合多智能体优化方法验证了模型, 但主要针对信息系统与物理系统时空异构性和数据不同步问题。文献[14]结合元胞自动机理论给出考虑冷热电协同控制的能源路由器设计方案, 并提出一种集中分散相融合的分布式协调控制策略, 下一步还需建立精确的负荷模型和统一控制策略。

本文以面向微能源网的 CPS 作为研究对象, 提出了微能源网 CPS 的基本构架; 针对微能源网 CPS, 通过建立物理层面的能量网络模型和能源耦合枢纽模型来表示能量的传递转化过程, 尝试扩展电网公共信息模型, 建立了微能源网统一信息模型; 基于分布式多智能体网络一致性协调控制理论, 仿真验证了有响应时滞的微能源网 CPS 系统中一致性控制的有效性, 为后续的研究奠定了基础。

1 微能源网与 CPS 基本构架

1.1 微能源网

微能源网是集能源互联、转化、耦合和存储等功能于一体的小型综合能源供应系统^[15]。微能源网作为能源互联网的重要组成部分, 也是微电网的升级与发展, 其基本结构如图 1 所示。

图 1 所示的微能源网中, 太阳能和风能等可再生能源以及天然气等清洁能源成为满足负荷需求的最主要一次能源, 从而减少煤炭和石油等传统化石能源的使用量。包含冷热电三联供系统(Combined

Cool, Heat and Power, CCHP)、储能系统等部分的能源耦合枢纽将一次能源转化为系统需要的电能、热能和天然气, 供给用户负荷。

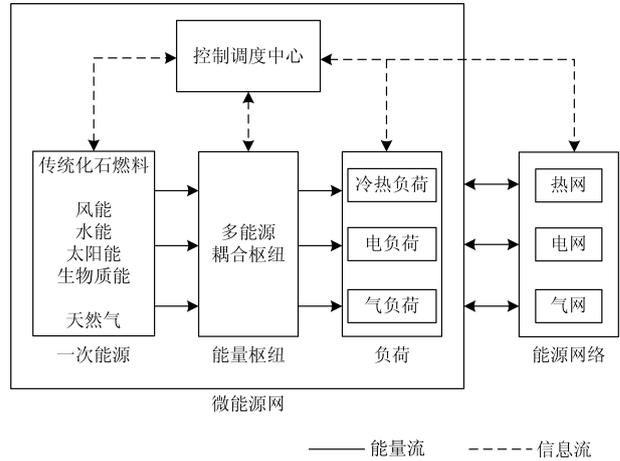


图 1 微能源网的基本构架

Fig. 1 Framework of micro-energy network

为了实现多种能源的耦合转化、最大限度地提高能源利用率, 微能源网的控制调度中心协调各种能源之间的配合, 使微能源网始终运行在最优状况之下。微能源网留有与外界能源网络的连接接口, 可以孤岛运行, 也可以并网运行; 并网运行时可以实现能量的双向传递, 本地能源盈余时向外界能源网络输送能量, 本地能源不足时从外界能源网络获取所需的能源。

微能源网可以减少经济成本, 大幅提高能源的利用效率, 符合节能减排和可持续发展的战略思路, 有较大的研究价值。但是微能源网中包含多种能源形式的互通互联, 能量流动、信息传递过程复杂, 运行策略制定困难; 而 CPS 的感知、计算、通信和控制功能可以更好地实现微能源网之间以及微能源网内部多能源之间的耦合互动, 促进能源互联网的发展。

1.2 面向能源互联网的信息物理系统

CPS 的基本结构如图 2 所示。

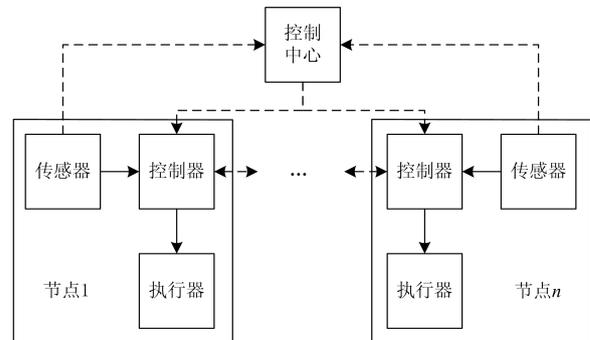


图 2 CPS 的基本结构

Fig. 2 Structure of CPS

CPS 的物理结构主要包括具有感知功能的传感器和实现控制功能的执行器，或者是同时具有感知和控制能力的物理节点；信息系统又包括网络通信系统和计算控制系统。在 CPS 运行的过程中，物理层的传感器通过对环境的感知采集数据信息，针对外界环境或者用户需求的变化，本地处理器自动调整内部关联与模型，作用于执行器做出响应；同时将信息通过通信网络传递给相连的其他节点和计算控制中心，拥有更高优先级的控制中心可以根据全局状况控制执行器的响应状态。

将 CPS 引入到微能源网中，可以实现微能源网计算、通信、控制等功能的智能化改造，进而提升能源互联网的智能化和自动化水平。本文提出一种微能源网 CPS 结构如图 3 所示。

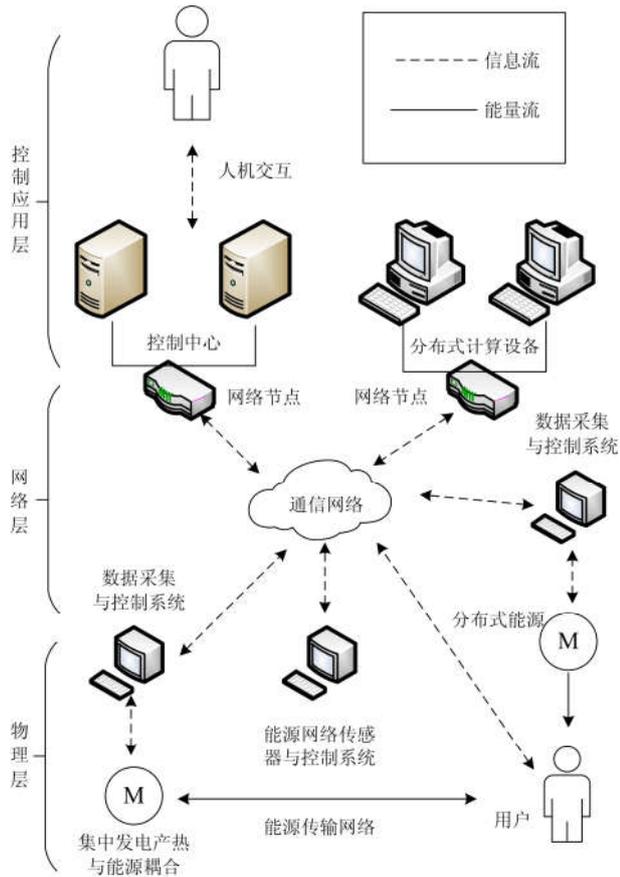


图 3 微能源网 CPS 结构

Fig. 3 Structure of CPS for micro-energy network

本文将微能源网 CPS 构架简单分为三层：

1) 物理层。是系统的基础和依托，也是系统构架的最底层，由能源网络及其监测设备、传感器、执行器等物理组件构成。具体包括微能源网中的供电设备、传输网络、储能、保护装置、负荷单元等

组件，采集数据的传感设备以及实现控制功能的执行设备等。

2) 网络层。通信作为 CPS 的重要功能，其安全稳定及实时性是系统运行控制的保障；本层主要负责完成能源系统的数据传输和资源共享功能，包括信息采集后的初步处理过程和信息收发传递过程中的所有相关传输协议和硬件组件。

3) 控制应用层。微能源网系统的“大脑”，负责完成 CPS 的计算和控制功能，并将能源 CPS 系统友好地呈现给用户。包括计算设备和控制中心，对底层上传的数据进行整合计算，得出最优控制策略并对底层执行器施行反馈控制。本层除了系统本身的智能控制外，还包括人机接口等应用，方便系统发生故障时人为参与系统的协调控制运行。

本文从 CPS 功能角度出发，将微能源网 CPS 分为物理层、网络层和控制应用层三层。在实际设计系统时，可以根据不同的情况细化分层，比如控制应用层即可细分为向下的控制层和面向应用和人机交互的应用层等。

2 微能源网信息物理模型

2.1 微能源网物理模型

微能源网中涉及冷、热、电、气等多种能源，多条能量传递线路互相连接形成了能量网络。在不同的能量网络中分析其能量传输过程：对任一回路，各线路强度量变化量之和为 0；对任一节点，流入该节点的广延量等于流出该节点的广延量^[16]。由此可以得到常见的能源网络集中参数等效传递方程式(1)和统一的能量网络方程组式(2)。

$$H^* = \frac{X_A - X_E}{R} \quad (1)$$

$$\begin{cases} AH = 0 \\ B_f \Delta X = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： H^* 是广延量积分的拉格朗日中值，也称作传递过程中的等效广延量流； X_A 和 X_E 分别是线路输入端和输出端的强度量； R 是能阻，即能量在网络中传递时遇到的阻碍作用，在电力系统中即电阻，在流体传递过程中为流阻； A 为网络关联矩阵； H 为广延量流量矩阵； B_f 为基本回路矩阵； ΔX 为线路两端强度量差值矩阵。

微能源网的核心是能源枢纽，其本质功能是完成不同能源的相互转化，是描述多种形式能源的输入和输出的函数关系，可以利用一个耦合矩阵 C 来表示。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

可以简记为

$$L = CP \quad (4)$$

式中: $L_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示微能源网中能量枢纽的第 i 种能源形式的输出; $P_j (j=1, 2, \dots, m)$ 表示能量枢纽的第 j 种能源形式的输入; c_{ij} 是耦合因子, 一般由分配系数和效率两部分组成, 分配系数可以人为加以控制, 但效率是一个受设备、环境等影响的函数^[17], 可能存在非线性元素。

微能源网中的太阳能发电、风力发电、燃气轮机、余热锅炉、制冷制热和储电储热等单个组件的数学模型较为成熟, 在此不再赘述。

2.2 信息系统模型

信息建模是通过抽象描述物理世界中的事物及其关系, 建立起能用于信息系统的模型, 可以看作是对物理事物或过程的信息进行形式化的结果。统一建模语言(Unified Modelling Language, UML)是一种面向对象的建模语言, 它使用图形或者图标的形式来对对象进行描述, 比编程语言抽象层次更高。使用面向对象技术设计微能源网系统时, 首先应该描述微能源网的需求, 搭建基本构架, 根据需求建立其静态模型, 在此过程中, 主要是建立系统类图和组成结构图; 其次是描述系统的行为, 这些行为可以表示系统的执行过程, 也可以表示执行过程中的顺序关系和交互关联, UML 的动态行为建模机制主要是建立状态图。

公共信息模型(Common Information Model, CIM)是一种描述电力事物及相关数据的语义信息模型, 它使用标准的 UML 把电力系统对象表示为类和属性, 并通过类之间的关联表示这些实体对象的职责和协作关系。标准的 CIM 只含有电力系统中的组件而没有能源部分相关定义, 但 CIM 是一个开放的可扩展模型, 可以根据实际情况来对 CIM 进行裁剪和扩充。光伏发电、风力发电、燃料电池等分布式能源是微能源网的重要组成部分, 其 CIM 模型可以被扩展定义^[18]; 能源耦合过程可以将电热、电气的耦合点看作是电网中类似储能的能源转换接口。这样就可以将 CIM 的应用拓展到能源系统。

基于 CIM 搭建微能源网的信息平台构架, 如图 4 所示。将能源耦合枢纽、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、调度自动化系统和规划系统等基础数据按照统一规范和标准存储在数据库

中, 消除异构数据源的差异性; 统一数据库提供公共编码、公共模型等服务; 同时, 统一数据库中的信息又可以实时地可视化展示并参与分析决策, 实现微能源网中异构应用系统信息的共享与交互。

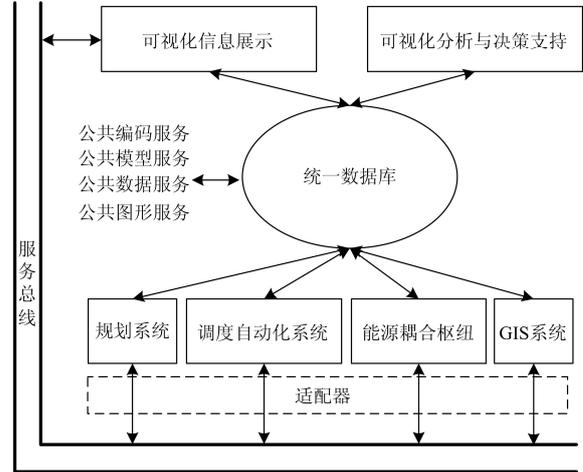


图 4 微能源网信息平台构架

Fig. 4 Architecture of information platform for micro-energy network

微能源网信息物理系统的数据主要分为周期性数据流、随机性数据流和突发性数据流。这些数据在通信网络的传输过程中, 各个环节都会产生延时, 物理组件之间的端到端延时 T_{delay} 可表示为

$$T_{delay} = T_{send} + T_s + T_{wait} + T_{recieve} \quad (5)$$

式中: T_{send} 表示节点生成信息包和转化格式所需的时间; T_s 表示在物理层发送和传输信息包的时间; T_{wait} 表示在网络层缓存队列中的排队时间和等待空闲信道的的时间; $T_{recieve}$ 表示接收解析信息包的时间。

除延时外, 由于微能源网信息物理系统结构复杂、数据极多, 通信系统在传输的过程中可能会发生网络拥塞、丢包或者错传等行为。当选择 TCP 协议作为通信标准时, 通信网络可以通过阻塞控制协议、超时重传等方式保证数据传输的可靠性。

相比微能源网中物理属性的连续变化, 通信信息的传输和决策都是基于离散的数据, 因此微能源网信息物理融合系统属于混合系统的范畴。在混合系统中, 常用有穷状态机^[8]来描述系统不同状态之间的转换关系, 同时用微分方程对系统的行为进行模拟描述。图 5 所示的混合系统模型可以实现微能源网中信号的感知与状态之间的自动切换: 外界环境或者用户需求发生变化时, 传感系统采集信息, 触发切换逻辑条件, 微能源网的运行状态发生相应的改变, 与此同时代表系统状态的微分方程也会发生相应的改变, 以应对外界环境或者需求的变化。

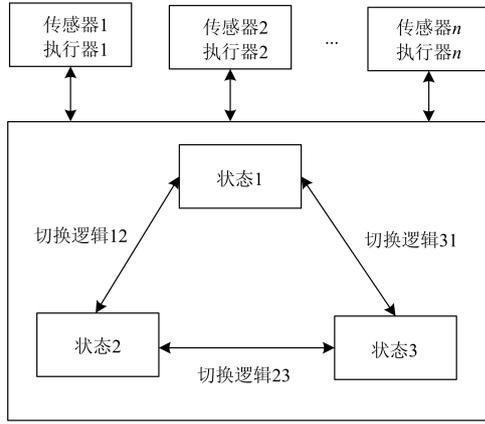


图5 基于有穷状态机的混合系统模型

Fig. 5 Hybrid system model based on finite state machine

可见，动态模型与物理和信息的静态模型共同构成了统一的系统模型。为了统一信息与物理模型，可以使用混合仿真的方法，在能源系统和信息通信系统分别搭建系统仿真模型，保证两个系统模型的准确和完整。通过使用 Matlab 仿真物理过程，在 Enterprise Architect(EA)中利用 UML 描述 CIM，用动态链接库(.dll)连接两个仿真平台，实现仿真层面的信息物理融合。

3 网络一致性理论控制方法

本文采用分布式多智能体网络一致性理论对微能源网 CPS 的收敛性进行协调控制，实现微能源网的智能调控。

3.1 网络一致性理论

所谓一致性是指在一个多智能体系统中，随着时间的推移，系统中所有的智能体的状态都趋向于一个相同的值。本文以具有不同时滞的一阶连续多智能体网络的一致性为例展开讨论。

考虑连续时间一阶多智能体系统如式(6)。

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \quad i \in N \quad (6)$$

式中， $x_i(t) \in R$ 和 $u_i(t) \in R$ 分别表示第 i 个智能体在 t 时刻的状态和控制输入。当 $\forall i, j = 1, 2, \dots, N$ ，节点 i 与节点 j 的相对位置逐渐趋近于 0 时，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0 \quad (7)$$

称系统能渐进达到一致。

在微能源网 CPS 中，不论输入输出还是需求响应过程都存在时滞现象，因此对具有时滞的系统一致性算法的研究更为重要。文献[19-20]分析得到了输入时滞和通信时滞相同的系统的一致性条件式(8)和只存在通信时滞不存在输入时滞系统的一致性条件式(9)。

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j(t - T_{ij}) - x_i(t - T_{ij})) \quad (8)$$

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j(t - T_{ij}) - x_i(t)) \quad (9)$$

式中： T_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的通信时滞； a_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的连接系数。

在上述分析的基础上，可以得到具有相同的输入时滞和不同响应时滞的一阶多智能体网络系统的一致性公式如式(10)。

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j(t - T) - x_i(t - T)) \quad (10)$$

式中， T 表示节点自身的输入时滞。

结合式(6)和式(10)可以将所研究系统的一致性算法表示为

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j(t - T) - x_i(t - T)) \quad (11)$$

3.2 算例分析

假设一个简化的微能源网仿真系统如图 6 所示，微能源网中主要设备包括两组风机、两组太阳能发电装置、一组以天然气为燃料的 CCHP 装置、相关储能装置以及冷热电负载。

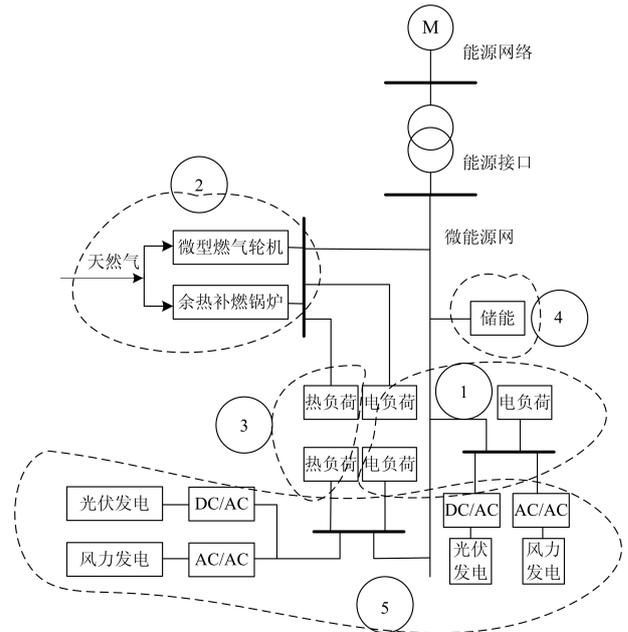


图6 微能源网仿真系统

Fig. 6 Simulation system of micro-energy network

将图 6 进行了虚拟分区：1 区为电负荷，需求为 300 kW；2 区为 CCHP 部分，每小时输入的能量为 300 kWh；3 区为冷热负荷，需求为 150 kW；4 区为 100 kW 的储能，初始状态为半满状态；5 区为

光伏发电、风力发电等可再生能源输入, 装机容量为 200 kW。其等效拓扑如图 7 所示。

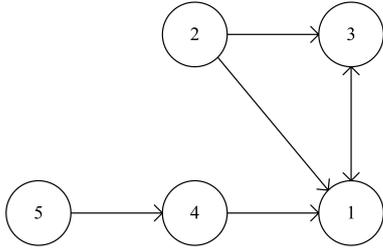


图 7 微能源网等效拓扑

Fig. 7 Equivalent topology of micro-energy network

图 7 为有向图。对微能源网应用分布式一致性理论, 五个节点的初始值分别记为 -300、+300、-150、+50、+200 kWh, 其中正数表示节点能够提供的输出功率, 负数表示节点需要的功率差额。一致性理论的控制目标是在有输入时滞和通信时滞的情况下尽快让微能源网达到供需平衡, 即节点值为 0。

假定电转热的效率 $\eta_{13}=0.8$; 根据相关文献^[21-22] 和市场调研, 微燃机发电效率在 35% 左右; 天然气燃烧除发电外, 其热能的回收效率可达 80% 以上。故假定 CCHP 的发电效率 $\eta_{21}=0.35$, 计算可得 CCHP 的热效率 $\eta_{23}=0.55$; 基于有机朗肯循环的余热发电技术可将低温余热转化为电能, 热转电效率约为 $\eta_{31}=0.1$; 储能放电以及传输效率为 $\eta_{41}=0.8$; 风光发电到储能的传输及充电效率为 $\eta_{54}=0.8$ 。因此可以列出拓扑图对应的邻接矩阵为

$$\mathbf{H} = (\eta_{ij})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.35 & 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

传输过程中的响应时滞包括考虑分区距离的通信延时以及设备响应时间。根据各区域职能, 分区 4 为储能部分, 是平抑可再生能源波动和维持供电稳定的保证, 故响应较快; 分区 3 为冷热负荷, 冷热能传输、响应等过程中存在较大的延时, 故响应较慢。因此, 假定各分区响应时滞分别为 $T_{13}=1.0$ s, $T_{21}=1.5$ s, $T_{23}=2.0$ s, $T_{31}=1.5$ s, $T_{41}=0.8$ s, $T_{54}=0.8$ s, 输入时滞 $T=0.3$ s。可以得到仿真结果如图 8 所示。

重新设定输入时滞 $T=0.5$ s, 其他条件不变, 系统仿真实验结果如图 9 所示。

由图 8 的仿真结果可以看出, 当有响应时滞的微能源网系统中出现负荷需求时, 在多智能体网络

一致性理论的调控下, 各分区节点可以通过自主协调完成需求的匹配, 其外在的表现即结果是收敛的。由图 9 可得, 当其他条件不变, 增加输入时滞时, 系统的收敛速度变慢, 但是收敛结果不变。因此, 在有响应时滞的微能源网系统中, 多智能体网络一致性理论能有效地对各分区节点进行调控, 并使其最终达到一致的调控指标。

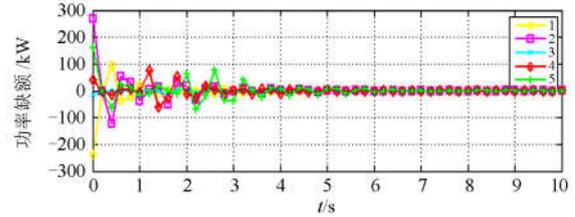


图 8 $T=0.3$ s, 系统的状态轨迹

Fig. 8 State of the system when $T=0.3$ s

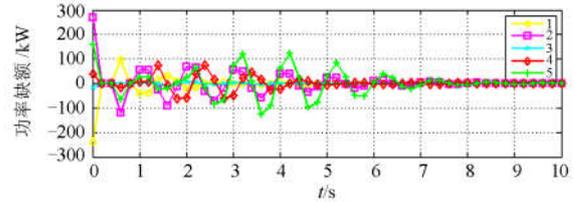


图 9 $T=0.5$ s, 系统的状态轨迹

Fig. 9 State of the system when $T=0.5$ s

在输入时滞为 $T=0.3$ s 的情况下, 重新设定响应时滞, 各节点的响应时滞皆减少 0.2 s, 系统仿真实验结果如图 10 所示。

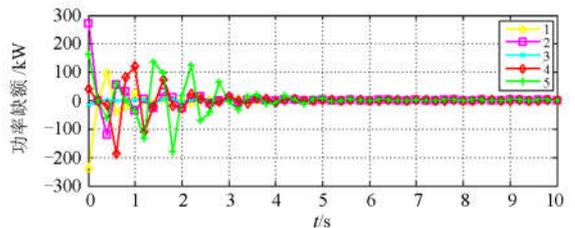


图 10 响应时滞改变时, 系统的状态轨迹

Fig. 10 State of the system when changing the response delay

对比图 8 和图 10 的实验结果可以看出, 在其他条件相同的情况下, 适当改变各节点的响应时滞, 并不会影响系统的收敛结果, 但对系统的动态性能会产生一定的影响, 适当调节系统中分区节点间的响应时滞可以在一定程度上提高系统的动态性能。但是, 响应时滞对系统状态轨迹的影响目前还没有统一成熟且确定的规律, 时滞也并不是越小越好, 而是和系统中分区间的联系有关, 在不同系统中有不同的最佳运行点, 需要通过多次尝试和实验来得

到更优的运行状态。

可见, 分布式多智能体网络一致性理论能够实现微能源网系统多种能源间的智能调控。通过对比实验, 说明微能源网 CPS 中存在的输入时滞和响应时滞不影响系统的收敛结果, 但是会影响系统的收敛速度和动态性能。

4 结论

本文根据现有的能源互联网和 CPS 的概念, 分别介绍了微能源网和 CPS 的架构, 提出了微能源网 CPS 的基本结构。针对微能源网信息物理融合系统, 建立了物理层面的能量网络模型和能源耦合枢纽模型来表示能量的传递转化过程; 将电网公共信息模型扩展到微能源网中, 建立了微能源网信息系统模型, 给出了信息系统的通信过程。最后, 基于分布式多智能体网络一致性协调控制理论, 将微能源网分区转换为有向拓扑图, 仿真验证了有响应时滞的系统中一致性控制的有效性, 为后续的研究奠定了基础。

参考文献

- [1] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] HU Bo, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [3] 张国荣, 陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.
- [4] 徐文进, 周桂新. 基于分布式电源的能源路由器设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 64-71.
XU Wenjin, ZHOU Guixin. Design and research of energy router based on distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 64-71.
- [5] 孙可, 吴臻, 尚楠, 等. 以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 1-9.
SUN Ke, WU Zhen, SHANG Nan, et al. Provincial regional energy internet framework and development tendency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 1-9.
- [6] 刘汉宇, 牟龙华. 微电网 CPS 体系架构及其物理端研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 34-37.
LIU Hanyu, MU Longhua. Architecture of microgrid CPS and research of its physical side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 34-37.
- [7] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.
- [8] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [9] 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.
- [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 modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [11] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 基于信息物理系统的孤岛微网实时调度的一致性协同算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1471-1480.
LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. A consensus-based collaborative algorithm for real time dispatch of island microgrid in cyber physical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1471-1480.
- [12] 马爽, 徐震, 王利明. 基于集合论的电网信息物理系统模型构建方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 1-5.

- MA Shuang, XU Zhen, WANG Liming. Set theory based modeling method of cyber physical system for power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 1-5.
- [13] 王冰玉, 孙秋野, 马大中, 等. 能源互联网多时间尺度的信息物理融合模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 13-21.
WANG Bingyu, SUN Qiuye, MA Dazhong, et al. A cyber physical model of the energy internet based on multiple time scales[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 13-21.
- [14] 陈娟, 黄元生, 鲁斌. 区域能源互联网信息物理建模及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 1-10, 23.
CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Cyber physical modelling and control strategy of regional energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 1-10, 23.
- [15] 白学祥, 曾鸣, 李源非, 等. 区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 65-72.
BAI Xuexiang, ZENG Ming, LI Yuanfei, et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 65-72.
- [16] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.
CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 66-76.
- [17] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [18] 何金陵. 基于SG-CIM的统一配电网信息模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 25-33.
HE Jinling. Research of distribution common information model based on state-grid CIM[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 25-33.
- [19] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [20] WANG W, SLOTINE J J E. Contraction analysis of time-delayed communications and group cooperation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(4): 712-717.
- [21] 刘豪, 朱彤, 张涛. 上海地区不同类型建筑的CCHP-ORC系统评价与分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3198-3205.
LIU Hao, ZHU Tong, ZHANG Tao. Evaluation and analysis of CCHP-ORC system for different buildings in Shanghai[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3198-3205.
- [22] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.

收稿日期: 2017-08-16; 修回日期: 2018-01-06

作者简介:

刘方泽(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电与微能源网; E-mail: 1631483@tongji.edu.cn

牟龙华(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量; E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

何楚璇(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微能源网协调控制。E-mail: 1252658@tongji.edu.cn

(编辑 魏小丽)