

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191190

基于消息总线的综合能源系统时间序列潮流的协同仿真方法

孙宏宇^{1,2}, 张沛超^{1,2}, 陈永华³

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240;
2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 3. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 综合能源系统(Integrated Energy System, IES)中存在复杂的能量耦合关系和多重扰动变量, 这给多能流联合潮流计算提出了新的挑战。首先从耦合元件和耦合变量的角度, 分析了运用分解法求解联合潮流的思路。然后提出了基于消息总线的电、热、气联合潮流的协同仿真架构, 建立了仿真子系统之间的消息发布与订阅机制。接着, 为了满足仿真子系统之间迭代的要求以及时间序列潮流计算的要求, 提出了 IES 协同仿真的时间同步规则。最后, 以一个典型的区域 IES 为例进行了仿真计算。结果表明, 该方法能支持多能流的时间序列潮流计算, 且实现了协同仿真的收敛性。

关键词: 综合能源系统; 协同仿真; 消息总线; 耦合变量; 时间序列潮流

A co-simulation method for time series energy flow of integrated energy system based on message bus

SUN Hongyu^{1,2}, ZHANG Peichao^{1,2}, CHEN Yonghua³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Power Conversion Control, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: There are complex energy coupling relationships and multiple disturbance variables in Integrated Energy Systems (IES). These pose new challenges to the calculation of multi-energy flow. First, the idea of solving combined energy flow by a decomposed method is analyzed from the point of coupling elements and coupling variables. Secondly, a cooperative simulation framework of electric, heat and gas energy flow based on a message bus is proposed, and the mechanism of message publishing and subscribing between simulation subsystems is established. Then, the time synchronization rules of IES collaborative simulation are proposed for the requirements of inter-iteration between subsystems and energy flow calculation of time series. Finally, a typical regional IES is taken as an example for simulation calculation. The results show that the proposed method can support a multi-function flow time series power flow calculation, and achieve convergence of collaborative simulation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905000).

Key words: integrated energy system; co-simulation; message bus; coupling variables; time series load flow

0 引言

高效、可持续的综合能源系统(Integrated Energy System, IES)^[1-3]是人类社会能源变革的必由之路。多能流联合潮流(以下简称为联合潮流)计算是分析 IES 的基础, 在 IES 规划^[4]、稳态运行分析^[5]与评价^[6]、多能流静态安全分析^[7]以及状态估计^[8]和调度优化^[9-10]等方面都发挥了关键作用。

与电网潮流计算相比, 联合潮流计算因两方面问题而变得更为复杂^[11]。第一个问题是多个能源系统之间存在热电联供机组(Combined Heat and Power, CHP)^[12]、电锅炉、燃气锅炉等能量耦合元件。对此问题, 早期思路是将电、热、气网整体建模并统一求解^[13-15]。但由于不同能源系统物理特性、参数量级差异大, 整体仿真效率并不高, 并且各能源系统之间仅存在弱耦合, 整体仿真增加了不必要的复杂性。为此, 后续研究提出了分解法^[16-20], 即各能源系统独立建模, 然后通过交换信息完成仿真。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905000)

例如, 文献[16]提出了电网潮流的全纯嵌入算法, 用于加快联合潮流的计算速度; 文献[17]验证了利用分解法可以在联合潮流计算中继续使用成熟的电网潮流软件; 文献[18]提出了辐射状热网潮流的前推回代法; 文献[19]分析了 CHP 功率的收敛过程; 文献[20]分析了 IES 的完全解耦、部分耦合以及完全耦合等运行模式, 提出了对应的联合潮流算法。虽然已有文献利用不同能量耦合场景验证了解析法的优势, 然而, 不同能源系统的耦合场景较多、耦合变量类型复杂, 但已有文献均针对特定场景, 缺乏整体架构设计, 方法的可扩展性与通用性较差。

第二个问题是电、热、气系统内包含多重扰动变量, 如负荷、随机能源、气温等, 其变化周期各不相同, 难以通过断面潮流结果全面分析、评价 IES 的稳态运行。针对这个问题, 近年来研究者开展了准静态时间序列(Quasi Static Time Series, QSTS)潮流计算的研究。文献[21]给出了时间序列潮流的两个特征: (1) 输入中包含时间序列数据, 需连续计算多个时间断面的稳态潮流; (2) 后一次潮流计算需要继承前一次潮流计算的条件, 如变压器分接头位置、电容器投切情况及控制器动作情况等。文献[22-24]针对风电、光伏和电动汽车接入电网的场景进行了时间序列潮流计算, 分析了扰动变量对系统的影响。但上述研究仅针对电力系统。若能将时间序列潮流

推广到 IES 中, 将有助于分析联合潮流的时空分布规律, 挖掘不同能源系统之间负荷转换与平移的潜力, 提升能源利用效率, 保障 IES 的稳定运行。

针对上述问题, 本文提出了 IES 时间序列潮流的协同仿真方法, 主要创新点在于: (1) 利用多能流系统松耦合的特点, 提出使用消息总线集成电、热、气等仿真子系统, 构成一种开放、通用、可扩展的协同仿真架构; (2) 依据 IES 特点建立了消息管理机制, 分析了协同仿真中的消息订阅关系; (3) 提出协同仿真的时间同步规则, 能同时满足仿真子系统之间迭代的要求和时间序列潮流计算的要求。

1 IES 联合潮流的分解算法

为方便后续论述, 本文基于文献[5,19]中的算例, 首先给出一个典型的区域 IES, 如图 1 所示。该算例由 32 节点热力网络^[19]、8 节点电力网络^[19]和 11 节点天然气网络^[5]组成。图中耦合元件包括燃气型 CHP、电锅炉和压缩机。IES 中电网的运行模式包括并网和离网^[13,19]。本文假设: 在并网模式下电网节点 5 与大电网相连并作为平衡节点; 在离网模式下电网节点 5 接入小型光伏, CHP 所在的节点 2 为平衡节点。在离网模式下, 由于平衡节点处存在耦合元件, 系统间耦合关系更为紧密, 联合潮流计算更为复杂, 常需要进行多次迭代^[16,19]。

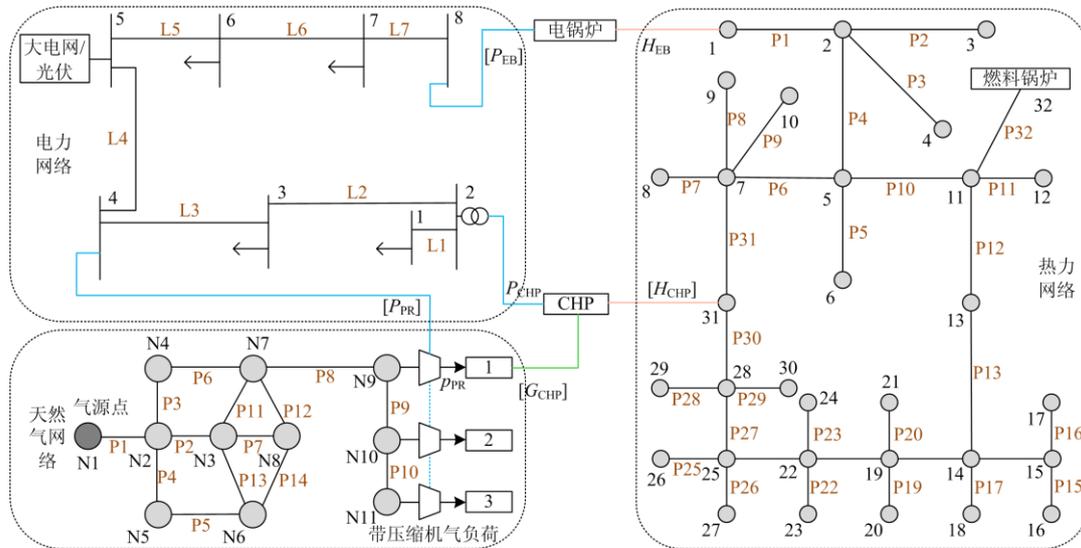


图 1 典型区域 IES 示例

Fig. 1 Examples of a typical regional IES

图 1 中各耦合元件有如下耦合变量: CHP 的电功率 P_{CHP} , 电锅炉电功率 P_{EB} , 压缩机电功率 P_{PR} ; CHP 的热功率 H_{CHP} , 电锅炉热功率 H_{EB} ; CHP 消耗的天然气流量 G_{CHP} , 压缩机为 CHP 输气提供的压

强 p_{PR} 。在上述耦合变量中, 一部分变量为电、热、气网各自进行潮流计算的输入边界条件, 本文以 [] 标识。上述耦合变量需满足如下潮流约束方程:

$$f_E(P_{CHP}, [P_{EB}], [P_{PR}]) = 0 \quad (1)$$

$$f_H([H_{CHP}], H_{EB}) = 0 \quad (2)$$

$$f_G([G_{CHP}], p_{PR}) = 0 \quad (3)$$

式中, f_E 、 f_H 、 f_G 分别表示电、热、气网的潮流模型。

需说明的是, 由于本文仅研究协同仿真, 故并不关注 f_E 、 f_H 、 f_G 的具体数学模型, 也不规定电、热、气网各自内部的潮流算法。

将式(1)一式(3)改写为如下形式:

$$f'_E([P_{EB}], [P_{PR}]) = P_{CHP} \quad (4)$$

$$f'_H([H_{CHP}]) = H_{EB} \quad (5)$$

$$f'_G([G_{CHP}]) = p_{PR} \quad (6)$$

各耦合元件还需满足自身的耦合关系式:

$$f_{EB}(H_{EB}) = [P_{EB}] \quad (7)$$

$$f_{CHP,1}(P_{CHP}) = [H_{CHP}] \quad (8)$$

$$f_{CHP,2}(H_{CHP}) = [G_{CHP}] \quad (9)$$

$$f_{PR}(p_{PR}) = [P_{PR}] \quad (10)$$

式中: f_{EB} 为电锅炉的热-电关系; f_{CHP} 为 CHP 的电-热关系和热-气关系; f_{PR} 为压缩机的压强-电关系。

则采用分解法进行 IES 联合潮流计算时, 基本思路与过程为: 电、热、气网首先按式(4)一式(6)固定各自的边界条件, 这样即可独立完成潮流计算并得到各系统的输出变量(P_{CHP} , H_{EB} , p_{PR}); 然后由耦合关系式(7)一式(10)计算出新的边界输入条件; 系统间交换边界条件并重复上述过程, 直至协同仿真收敛。

根据上述原理, 本文提出以下的基于消息总线的 IES 协同仿真方法。

2 基于消息总线的协同仿真方法

2.1 协同仿真消息总线

根据文献[25]的联邦化仿真思路, 本文提出了 IES 的协同仿真系统架构, 如图 2 所示。图中, 电、热、气等仿真子系统(仿真软件)运行于独立的计算机或独立的进程; 同时, 彼此之间基于消息总线实现协同, 共同完成“系统之系统”(System Of System, SOS)仿真^[25]。现有成熟的仿真软件普遍提供编程接口^[17], 可据此开发适配器软件进行接口转换, 使其接入消息总线。这种基于消息总线的松耦合结构允许按需动态组成协同仿真系统。需说明的是, 本方法也可接入通信仿真子系统^[26], 但限于篇幅, 本文不讨论通信仿真。

消息总线提供消息管理和同步管理机制。其中, 消息管理提供消息发布与订阅机制。

(1) 消息发布: 是指由各仿真软件向消息总线发送消息。消息采用流行的(topic, key, value)格式。其

中, topic(主题)是耦合元件的全局唯一标识符, 如 CHP 的 ID; key(键)是耦合变量的标识符, 如 P (有功功率)、 H (热功率)、 G (天然气流量)、 p (压强)等; value(值)是该耦合变量的实时测量/控制值。

(2) 消息订阅: 在仿真初始化时, 各仿真软件按“topic/key”向消息总线订阅消息; 在仿真过程中, 消息总线仅将订阅的消息发送至相关仿真软件。

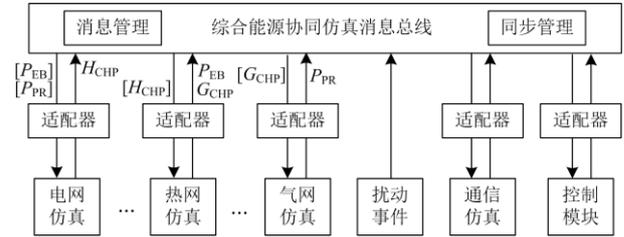


图 2 基于消息总线的 IES 协同仿真系统架构

Fig. 2 Architecture of IES co-simulation system based on message bus

2.2 消息订阅关系

以针对图 1 所示 IES 的协同仿真为例, 图 3 将电、热、气等仿真子系统的消息订阅关系进行可视化, 图中箭头代表消息发送方向。可以发现消息订阅关系存在两种典型情况, 下面分别加以分析。

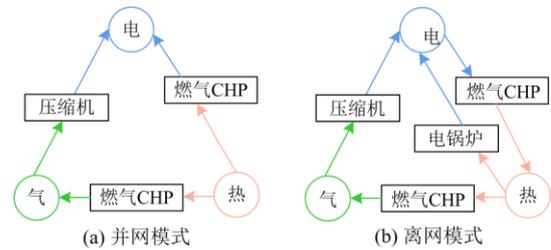


图 3 IES 协同仿真中的消息订阅关系

Fig. 3 Message subscription relationships in IES co-simulation

图 3(a)对应 IES 处于并网模式的情况, 其主要特点在于不存在环形订阅关系。并网模式时以大电网节点 5 作为平衡节点, CHP 工作于以热定电模式。此时, 热网无需订阅其他子系统的消息, 可独立计算潮流; 电网潮流计算的输入边界条件为 CHP 的电功率和气网压缩机的电功率。为保证潮流的唯一性, 电锅炉的电功率为给定值^[19]。

图 3(b)对应 IES 处于离网模式的情况。在离网模式下, 电网潮流计算以 CHP 所接入节点 2 作为平衡节点, 这样, CHP 电功率不再是电网潮流计算的输入边界条件。热网在进行潮流计算时, 需反过来订阅 CHP 的出力。同时, 若热网潮流计算以电锅炉所在热网节点 1 作为平衡节点, 则电网潮流还需订阅电锅炉功率。这样, 图 3(b)中就存在多个环形订

阅关系, 这是与图 3(a)的关键区别。

消息总线的发布与订阅机制使得整个协同仿真框架不依赖于特定的电、热、气耦合场景, 具有很强的灵活性与通用性。下面进一步分析消息总线的时间同步管理机制。

3 协同仿真的同步管理

3.1 同步规则

消息总线的同步管理机制需要处理两种情况:

(1) 仿真子系统间迭代。由分解法的原理可知, 电、热、气网需要彼此交换边界条件才能达到收敛。在这种情况下, 同步管理机制用于保证当整个协同仿真未收敛之前, 仿真时间不能向前推进。

(2) 时间序列仿真。热、电负荷和环境温度等扰动变量是连续变化的。为减少潮流计算次数, 可采用周期采样、变化率判别以及变化幅度判别等方式进行离散化处理。本文采用变化幅度判别方法, 即仅当某一扰动变量的变化幅度超过一定阈值时才设置为时间序列事件。此外, 控制器的动作也会产生时间序列事件。上述事件的时刻都不尽相同, 为了提高协同仿真的效率, 本文在协同仿真层面并不采用固定的时间推进步长, 而是先判断下一个最近事件的发生时刻, 然后以该时刻作为协同仿真的同步点, 令各仿真子系统彼此交换边界条件。

本文提出如下的同步规则(设当前时刻为 T_0)。

Rule 1: 由每个仿真子系统自主申请下一时刻, 下一时刻按如下原则确定。

1.1、若该仿真子系统的输入边界条件仍在变化(即边界条件的变化量超过设定阈值), 则仍申请 T_0 作为下一时刻;

1.2、若该仿真子系统无输入边界条件, 或边界条件不再变化, 则下一时刻为其最近时间序列事件的发生时刻, 例如其下一个光伏出力的变化时刻;

1.3、若该仿真子系统为控制器, 则其下一时刻为控制器的执行延时, 如变压器分接头的动作时间。

Rule 2: 消息总线收集各仿真子系统所申请的下一时刻, 然后按文献[26]的策略, 按式(11)取最小值作为协同仿真的下一同步点。

$$T_{syn} = \min_i T_i \quad (11)$$

式中, T_i 为仿真子系统 i 申请的下一时刻。在该同步点, 各仿真子系统需通过消息机制交换耦合变量。

3.2 规则解释

下面以图 3(a)所示的并网模式为例, 解释上述同步规则。设当前时刻为 T_0 , 电、热、气网的下一个时间序列事件的发生时刻分别为 T_1 、 T_2 和 T_3 , 如

图 4 所示。

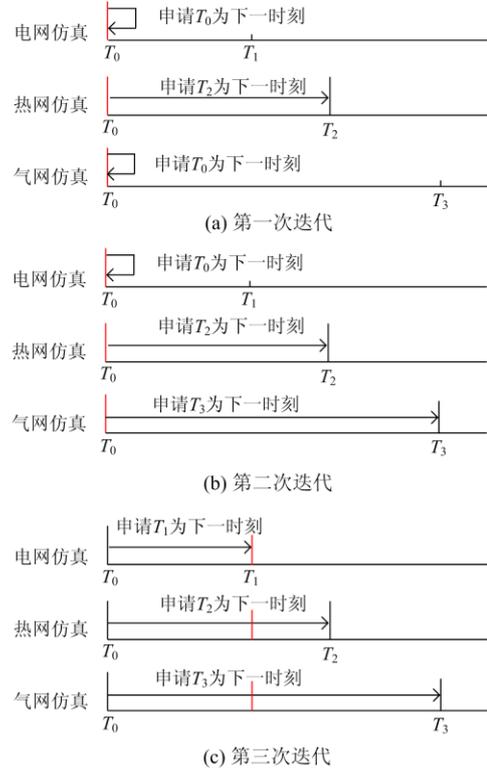


图 4 同步规则示意

Fig. 4 Illustration of the time synchronization rules

第一次迭代发生在协同仿真开始后, 电、热、气仿真子系统先独立完成一次潮流计算。由图 3(a)可知, 热网仿真子系统无输入边界条件, 则根据 Rule 1.2, 其申请 T_2 为其下一时刻; 由于 CHP 出力较之仿真初始时发生了变化, 故根据 Rule 1.1, 电、气网仿真子系统申请停留在当前时刻 T_0 。根据 Rule 2, 本次迭代结束后, 整个协同仿真系统的时间并不向前推进, 仍为 T_0 , 以上过程如图 4(a)所示。

在第二次迭代中, 气网仿真子系统判断 CHP 出力不再变化, 则其申请将仿真时刻推进至 T_3 。由于本次迭代中压缩机的功率仍在变化, 故电网仿真子系统仍申请停留在 T_0 。则本次迭代结束后, 协同仿真系统继续停留在 T_0 , 如图 4(b)所示。

在第三次迭代中, 电网仿真子系统的输入边界条件也不再变化, 则其申请 T_1 作为其下一时刻。至此, 三个仿真子系统的输入边界条件都不再变化, 整个协同仿真系统在 T_0 时刻达到收敛, 该时刻的潮流计算完毕, 如图 4(c)所示。根据 Rule 2, 协同仿真整体向前推进至 T_1 时刻, 各仿真子系统会根据扰动变量变化情况和控制器动作情况更新数据, 随后继续进行上述迭代过程, 直至完成所有时间序列事件仿真。

由上可见, 由于图 3(a)中不包含环形消息订阅关系, 协同仿真的迭代次数是可预知的。而图 3(b)中则包含环形订阅关系, 在每一个时间断面, 协同仿真所需的迭代次数是不可预知的, 这是两者的重要区别。但鉴于其遵循完全一致的同步规则, 本节不再对图 3(b)的情况进行分析, 而是通过下节的算例给予验证。

4 算例分析

本节继续采用图 1 的算例进行仿真分析。由于篇幅所限, 本节仅考虑该系统处于离网模式。

4.1 扰动变量所触发事件

算例系统包括如下周期性数据: 电网常规负荷(不包括电锅炉和压缩机)、热负荷、光伏出力和室外温度, 以上主要取自文献[27]的英国某大学校园数据, 时间分辨率皆为 15 min, 如图 5 所示。

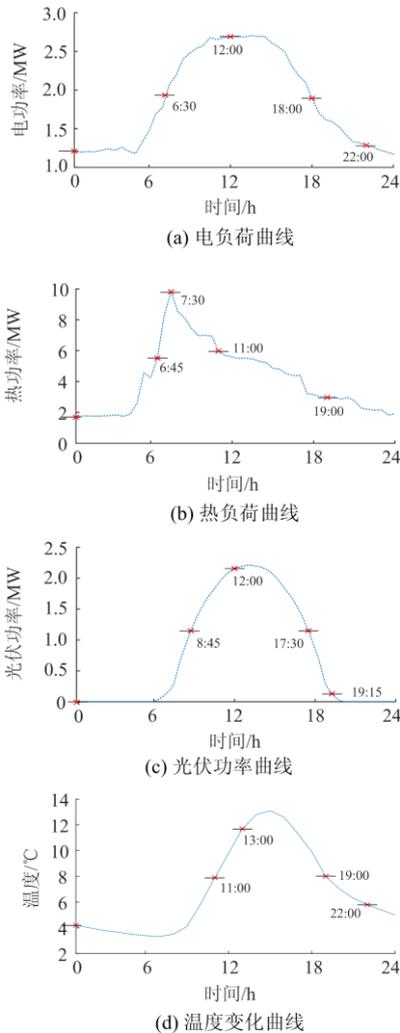


图 5 扰动变量所触发事件

Fig. 5 Events triggered by perturbation variables

时间序列潮流计算的时间跨度可达 1 年^[21-24], 本算例取一天作为跨度。为减少潮流计算次数, 本文对上述周期性数据做进一步抽样处理。以电网负荷为例, 设当负荷变化幅度超过 0.6 MW 时才认为是新的事件。同理, 热负荷、光伏出力和温度变化幅度阈值分别取为 3.0 MW、1.0 MW 和 2 °C。抽样事件在图中用红色“x”表示, 并标注了事件时刻。上述变化阈值可以根据需要设定, 以便在仿真计算量和精细度之间取得折衷。

4.2 控制器所触发事件

另一类时间序列事件由控制器触发。作为示意, 本文假设该 IES 使用如式(12)所示自动调压策略。

$$V_s = \begin{cases} 1.05 \text{ p.u.}, & V_{\min} > 1.05 \text{ p.u.} \\ 1.10 \text{ p.u.}, & V_{\min} < 0.95 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (12)$$

式中: V_s 为电网平衡节点处有载调压变压器二次侧的电压; V_{\min} 为距电源最远的负荷节点 8 的电压值。

设热网的热源使用如式(13)所示自动调温策略。

$$T_s = \begin{cases} 70 \text{ }^\circ\text{C}, & T_{\min} > 70 \text{ }^\circ\text{C} \\ 72 \text{ }^\circ\text{C}, & T_{\min} < 68 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_s 为热网热源出口温度; T_{\min} 为距热源最远的热负荷节点 17 的供给温度。

本文设定完成上述调压、调温操作分别需 0.25 h 和 0.5 h, 仿真中相应控制器按此申请下一事件时刻。

4.3 仿真结果

电网时间序列潮流计算结果如图 6 所示。图 6(a)表明, 电负荷以常规负荷和电锅炉为主。对比图 6(a)与图 6(b)可见, 在白天时段随着 CHP 出力的增加,

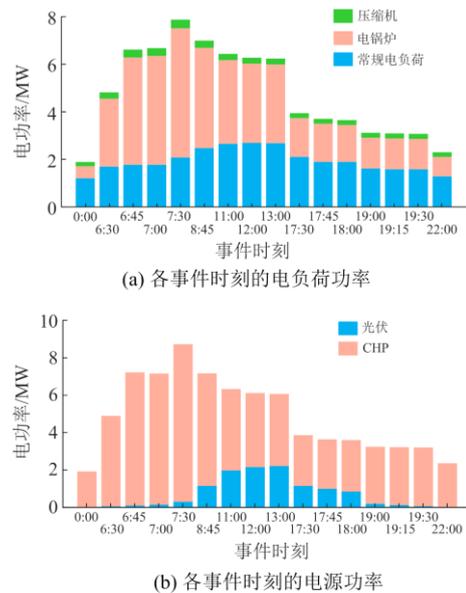


图 6 电网时间序列潮流计算结果

Fig. 6 Results of QSTS load flow of electric network

压缩机需提供更大压强以满足 CHP 对于天然气的需求, 压缩机所需电功率也会增加。

热网时间序列潮流计算结果如图 7 所示。燃气锅炉保持恒定热功率不变, 而 CHP 与电锅炉提供热功率的趋势与总热负荷变化趋势一致。

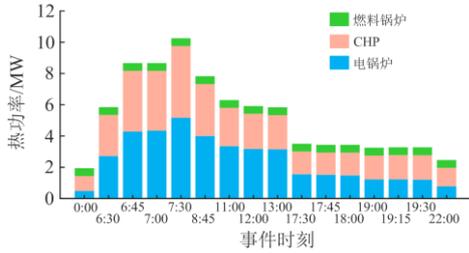


图 7 热网时间序列潮流计算结果

Fig. 7 Results of QSTS load flow of heat network

图 8 为采用了控制策略后, 电负荷节点 8 电压 V_{\min} 和热负荷节点 17 供给温度 T_{\min} 的变化情况。由图 8 可见, 采取控制策略后, T_{\min} 大部分时间稳定于 $68\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, V_{\min} 基本稳定在 $0.95\sim 1.05\text{ p.u.}$ 。

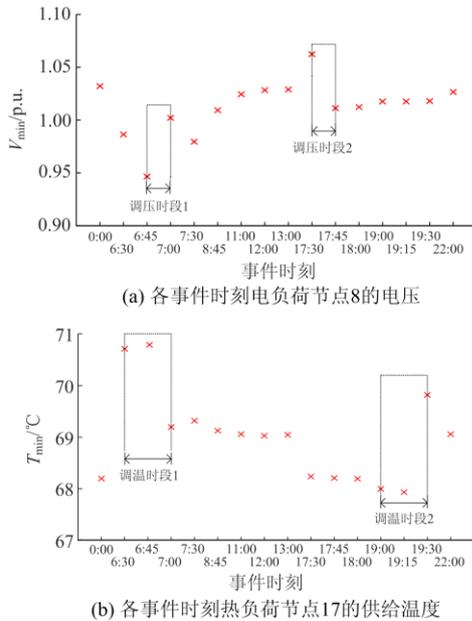


图 8 调压与调温控制结果

Fig. 8 Results of voltage and temperature control

选取 6:30、6:45 和 7:00 三个连续时间断面进行分析。6:30 时事件由扰动变量触发, 系统中热电负荷和温度相较于上一时刻均有明显上升, 此时热网出现 T_{\min} 大于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况, 则控制器会根据控制策略相应动作, 在 0.5 h 调温完成后触发新的事件, 且由于系统功率增加, 该时刻收敛所需迭代次数较上一时刻明显增加; 6:45 时事件同样由扰动变量触发, 系统中电负荷功率进一步增加, 此时电网出现

V_{\min} 小于 0.95 p.u. 的情况, 则控制器会根据控制策略相应动作, 在 0.25 h 调压完成后触发新的事件; 7:00 时事件由控制器触发, 此时热网调温和电网调压完毕, 电网平衡节点电压升高为 1.10 p.u. , 热网热源出口温度降低为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 使得 V_{\min} 与 T_{\min} 位于理想区间之内。

每次事件发生时, 协同仿真系统都需迭代才能收敛。图 9 给出了各事件类型和协同仿真的迭代次数, 可见迭代次数介于 4~11 之间。

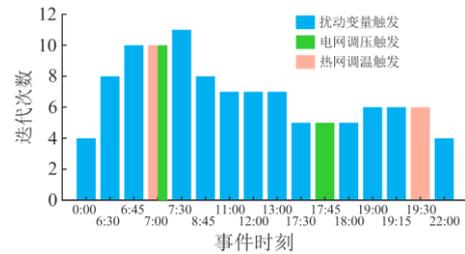


图 9 各事件时刻的迭代次数

Fig. 9 Number of iterations at each event time

图 10 展示了在 7:30 时间断面处, 电网输出结果 H_{CHP} 和热网输出结果 P_{EB} 的收敛过程。因电网子系统输出结果 H_{CHP} 为热网子系统的边界条件, 因此两者的收敛趋势相似。

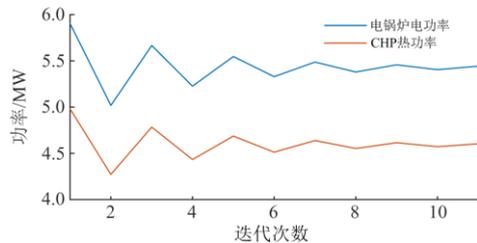


图 10 单一时间断面的收敛曲线

Fig. 10 Convergence curve of a single time section

5 结论

根据多能流之间物理特性差异大、松耦合的特点, 本文提出利用电、热、气网等多个仿真软件实现综合能源系统协同仿真的方法。通过消息订阅与发送机制, 多能流仿真软件可动态组成一种松耦合、联邦化的协同仿真结构, 能够充分发挥已有仿真软件的作用, 并能适应灵活多变的能量耦合场景; 通过时间同步机制, 能实现协同仿真的收敛, 并能实现多能流时间序列潮流计算, 从而能够在较长时间尺度内评价综合能源系统的稳态运行情况。

本文下一步将在协同仿真中集成商用或开源仿真软件, 以进一步验证所提出的协同仿真方法。

参考文献

- [1] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [2] 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.
- [3] 王珺, 顾伟, 张成龙, 等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 89-97.
WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 89-97.
- [4] YANG Kun, DING Yan, ZHU Neng, et al. Multi-criteria integrated evaluation of distributed energy system for community energy planning based on improved grey incidence approach: a case study in Tianjin[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 352-363.
- [5] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 21-33.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 21-33.
- [6] CHEN Juanwei, YU Tao, XU Yue, et al. Fast analytical method for reliability evaluation of electricity-gas integrated energy system considering dispatch strategies[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 260-272.
- [7] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(6): 1627-1634.
PAN Shaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1627-1634.
- [8] 陈皓勇, 王晓娟, 蔡永智, 等. 复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(1): 1-10.
CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, CAI Yongzhi, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 1-10.
- [9] 陆海, 罗恩博, 陈波, 等. 考虑热管网动态特性的热电协同优化调度[J]. *智慧电力*, 2019, 47(10): 104-111.
LU Hai, LUO Enbo, CHEN Bo, et al. Cogeneration optimal scheduling considering dynamic characteristics of heat pipe network[J]. *Smart Power*, 2019, 47(10): 104-111.
- [10] 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 algorithm for regional integrated energy system[J]. *Smart Power*, 2019, 47(9): 19-28.
- [11] 马凯琪, 吴迪, 郑灏. 综合能源系统混合仿真技术路线探讨[J]. *供用电*, 2018, 7(1): 28-33.
MA Kaiqi, WU Di, ZHENG Hao. A look at hybrid simulation technology for integrated energy system[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 7(1): 28-33.
- [12] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 8-18.
- [13] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 2942-2950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for electric-thermal-gas integrated energy system[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [14] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [15] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 31(5): 3636-3647.
- [16] MASSRUR H, NIKNAM T, AGHAEI J, et al. Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity-gas-heat energy systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1565-1577.
- [17] 夏天, 陈瑜玮, 郭庆来, 等. 基于 PSASP 的电热耦合

- 能源系统潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 55-61.
- XIA Tian, CHEN Yuwei, GUO Qinglai, et al. Power flow calculation based on PSASP for combined thermal and electric energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 55-61.
- [18] 刘述欣, 戴赛, 胡林献, 等. 计及回水管网热损失的电热联合系统潮流模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 77-81.
- LIU Shuxin, DAI Sai, HU Linxian, et al. Power flow model and algorithm of combined power and heat system considering heat loss in return pipe network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 77-81.
- [19] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [20] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热联合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3934-3942.
- XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3934-3942.
- [21] RENO M J, DEBOEVER J, MATHER B. Motivation and requirements for quasi-static time series (QSTS) for distribution system analysis[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, USA: 1-5.
- [22] BOEHME T, WALLACE A R, HARRISON G P. Applying time series to power flow analysis in networks with high wind penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 951-957.
- [23] SCHNEIDER K P, MATHER B A, PAL B C, et al. Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 3181-3188.
- [24] QURESHI M U, GRIJALVA S, RENO M J, et al. A fast scalable quasi-static time series analysis method for PV impact studies using linear sensitivity model[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 10(1): 301-310.
- [25] 丁丁, 王杉, 魏急波, 等. 基于 HLA 的 OPNET 仿真联邦成员设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1601-1603.
- DING Ding, WANG Shan, WEI Jibo, et al. Research and implementation on OPNET simulation federate based on HLA[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1601-1603.
- [26] AL-HAMMOURI A T. A comprehensive cosimulation platform for cyber-physical systems[J]. Computer Communications, 2012, 36(1): 8-19.
- [27] LIU Xuezhi, ZHENG Yan, WU Jianzhong. Optimal coordinated operation of a multi-energy community considering interactions between energy storage and conversion devices[J]. Applied Energy, 2019, 248: 256-273.

收稿日期: 2019-09-28; 修回日期: 2019-11-18

作者简介:

孙宏宇(1995—), 男, 硕士, 研究方向为综合能源系统建模与潮流计算; E-mail: shy2017@sjtu.edu.cn

张沛超(1970—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制、可再生能源接入、能源互联网等; E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

陈永华(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为综合能源系统建模仿真与运行优化、有源配电网规划、保护与控制。

(编辑 魏小丽)