

考虑综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化方法

文/黄斌 姜龙 毕克 李康玉 唐浩
哈尔滨普华电力设计有限公司

提出考虑综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化方法。构建虚拟电厂综合能源模型，综合能源微网运行过程中的综合能源调度通过不同能源的交换来实现。构建目标函数，优化通用能源微网，基于综合需求响应设计虚拟电厂综合能源调度优化基本流程，实现综合能源调度优化。对比实验结果表明该研究方法能源之间转化效率最高，能够最大限度地利用综合能源。

能源转换设备和储存技术的发展改善了能源行业的结构，使各种形式和类型的能源可以相互联通、转换和支持，综合能源调度优化的研究已成为热点。青岛中德生态园、电网浙江电力有限公司等相关项目将在中国建设。电、气、热能等多种能源将联合运行，不仅提高了能源使用效率，还提高了应对不确定性的能力，减少了能源的损失，提高了能源供应的可靠性。考虑综合需求响应的能源调度优化为能源部门创造了更好的发展前景，但仍有许多关键问题亟待解决。电力的传输速度很快，但天然气运输的速度相对较慢。如何调整不同能量的差异，提高调度的灵活性，解决不同的不确定性，成为需要考虑的问题。目前，许多科学家已经在提高能源效率、防止负荷和新能源波动及优化运营经济性方面进行了研究。从经济性的角度出发，提出了电气连接模型的最大化调度优化模型，以提高新能源容量并防止负载波动。以优化为目的分析天然气的动态特性，旨在降低日常运营成本。建立了能源调度优化的线性综合日优化规划模型，并利用能量层方法提出了综合日能源交易策略的两层优化模型。建立对电热负荷需求的响应机制。建立综合经济效益和能源效率的多目标优化模型，引入绿电证

书交易机制参与运营优化，提高调动可再生能源使用的能力，并研究了优化综合能源模型运营目标和模式的解决方案。上述研究从不同方面关注综合能源优化调度方案，但优化时间尺度是统一的，不能反映不同能源运行的差异，缺乏灵活性分析。本文总结了电厂综合能源调度的灵活性特征和评价指标，介绍评估天然气资源可用性的网络分析方法，量化了电力资源灵活性能力，指出了综合能源调度运行灵活性的需求。上述研究列出了主要要求和灵活性评估指标。为了提高调度方法的柔性供应能力，对多能源和多时间尺度的混合优化进行研究。确定临时日优化，各种能源的优化规划是通过结合规划级别、实时优化和能源合作优化综合模型的平均值来实施的。使用灵活负载响应创建多时间优化规划模型，包括轨迹预测、能源规划和运行模式下的实时调整，提高模型的稳定性。然而，尽管上述研究中的许多时间尺度是在规划和日调整前结合在一起的，但通过制定下一个规划方案发现，时间尺度仍然单一，忽略了电力模型和天然气模型在时间响应方面的差异。考虑到缺乏对现有综合能源模型的研究，本文提出了一种考虑综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化方法，并考虑不同能源模型

和设备运行的差异以及模型资源的传输，能够更及时、高效地监测新能源和负荷的波动，结合机会的强大局限性，提高资源的灵活供应能力和抗风险能力。

考虑综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化方法设计

1. 构建虚拟电厂综合能源模型

综合能源模型是电力网和天然气网之间的连接模型，综合能源模型结构示意图如图1所示。

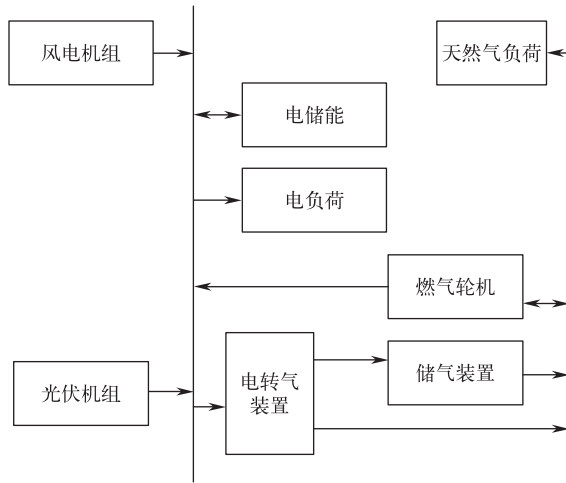


图1 综合能源模型结构示意图

整个能量模型结构主要由受控单元和可控单元两部分组成。设备包括两种：一种是燃气轮机、电气转换装置和储能装置等；另一种是可再生能源发电机组、负荷机组等。电力网和天然气网的连接通过将电转化为气来实现，两者之间的联系模型是线性的。

1) 如果可再生能源处于最全面的能源模型中，那么电力的天然气模型可以通过电气转换装置将多余的能源转化为天然气。电力和天然气转换装置包括电锅炉和电制冷机，可以完成热能和冷能的转换。可再生能源的功率和天然气流量之间的关联公式为

$$F_{p2G,i} = \eta_{p2G,i} p_{p2G,i} / G_{GHV} \quad (1)$$

式中， p_{p2G} 为电力到天然气转气模型； $p_{p2G,i}$ 为天然气流量； $F_{p2G,i}$ 为消耗电功率的速度； $\eta_{p2G,i}$ 为转化率； G_{GHV} 为天然气的高热值。

2) 对于燃气轮机模型，电力流量与天然气流量之比用功率表示为

$$P_{GT,k} = \eta_{GT,k} G_{GHV} \quad (2)$$

式中，GT为燃气轮机模型； $\eta_{GT,k}$ 为天然气流量的速度； $P_{GT,k}$ 为有功功率； η_{GT} 为有效输出； G_{GHV} 为转换的有效性。

3) 电力互联资产负债表模型充分考虑了上述两个模型之后，建立了电力互联资产平衡模型，表达式为

$$P_{g,t} + P_{w,t} + P_{GT,t} - P_{P2G,t} - P_{L,t} = 0 \quad (3)$$

$$F_{N,t} + F_{P2G,a} + (F_{S,t}^{out} - F_{S,t}^{in}) - F_{GT,t} - F_{L,t} = 0 \quad (4)$$

式(3)和式(4)都是平衡公式，式(3)对应于电力模型，式(4)对应于天然气模型的流速。在形式 t 中，下角用时间 t 表示， $P_{g,t}$ 、 $P_{w,t}$ 和 $P_{GT,t}$ 分别为光电发电机组、风力涡轮机和燃气涡轮机的有效输出； $P_{P2G,t}$ 为电力和气体转换装置的负载容量； $P_{L,t}$ 为电能量转化为气体装置的负载能力； $F_{N,t}$ 为天然气流动的速度； $P2G,a$ 是由电转换到气体转换装置产生的天然气流的速度； $F_{S,t}^{out}$ 为天然气流流动和注入储气装置的速度； $F_{GT,t}$ 为燃气轮机消耗的天然气流量； $F_{L,t}$ 为天然气负载流量。

2. 构建目标函数

通过对虚拟电厂综合能源模型的构建和相关性分析，确定的综合能源微网络运行过程中的综合能源调度可以通过不同能源的交换来实现，主要目标是确保能源质量。本文以评估综合能源质量为标准，确保高质量的综合能源使用水平。目前，评估综合能源质量的方法有两种：一是基于节能关系，即在第一次热力学立法的基础上，分析转化、运动、使用和能源损失，反映能源效率；二是基于平衡能量关系，即热力学第二次立法，分析其转化、运动、使用和损失情况，以有效地反映其运行的结果。在第一种方法中获得的能量效率不能通过能量质量的全面降低和损失来分析，而是从能源质量的角度对效率进行更科学、更全面地分析和能源质量评估，在节约和优化通用能源微网络方面发挥着关键作用。建立有效性的目标函数为

$$\max \eta_{ex} = \frac{\sum L_{e,t} + S_{e,t} + \omega_1 (L_{h,t} + S_{h,t}) + \omega_2 L_{c,t} + F_{N,t}}{\sum P_{e,t} + P_{g,t} + P_{S,t} + P_{w,t} + D_{w,t} + D_{e,t} + \omega_1 D_{h,t}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \omega_1 = 1 - \frac{T_0}{T_h} \\ \omega_2 = \frac{T_0}{T_c} - 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, η_{ex} 为效率; ω_1 、 ω_2 为与综合能源质量相对应的系数; T_0 、 T_h 和 T_c 分别为微网络环境的温度、热负荷和冷负荷; $L_{e,t}$ 、 $L_{h,t}$ 和 $L_{c,t}$ 为 t 时间内的电负荷容量、热负荷容量和冷却容量; $S_{e,t}$ 为存储中实际存入的能量; $S_{h,t}$ 为实际存储的能量; $D_{e,t}$ 为释放用于能源存储的实际能源; T 为免于损失的实际能源; $P_{e,t}$ 、 $P_{s,t}$ 为相应购买的电力和天然气的数量; $P_{w,t}$ 、 $P_{g,t}$ 分别为风力和光电功率。限制条件: 综合能源微网模型中的风电容量事故、时效性和波动性、光电容量和负荷通过增加模型的运行成本, 对模型的稳定可靠运行产生不利影响。然而, 风电、光电和负荷的意外分布很难测量, 甚至对其的预测也可能存在误差。优化模型将不确定性转化为等效的确定性约束, 使模型在任何情况下都能达到最佳条件, 同时考虑经济性和可信度, 以模型的最低运营成本为目标, 并设定限制条件。

1) 综合能源微网络模型的电力资产负债表限制包括多种用电方法。因此, 模型的运行必须尊重电力平衡的限制。平衡公式为

$$P_{g,t} + P_{w,t} + P_{GT,t} - P_{ESS,t} - P_{line,t} = P_{load,t} \quad (7)$$

式中, $P_{ESS,t}$ 、 $P_{line,t}$ 分别为储能模型和负荷线容量; $P_{load,t}$ 为负荷容量。

2) 当综合能源微网络模型在预留容量限制下运行时, 预留容量率与预留容量服务的寿命密切相关。过高的预留容量率可能导致预留容量服务的寿命缩短。因此, 预留容量率必须符合最高和最低限制。表达式为

$$P_{g,t} + P_{w,t} + P_{GT,t} - P_{ESS,t} + |P_{line,t}^{max}| \geq P_{load,t} (1 + L\%) \quad (8)$$

式中, $L\%$ 为备用容量率。

3) 发电机组的输出限制影响了光伏发电的生产能力

$$P_{g,i,min} \leq P_{g,i,t} \leq P_{g,i,max} \quad (9)$$

式中, $P_{g,i,t}$ 由发电机当时的有效容量组成; $P_{g,i,t}$ 的上限和下限用 $P_{g,i,max}$ 和 $P_{g,i,min}$ 表示。

4) 电力和天然气发电机的输出限制受到风力发电容量的影响和限制

$$P_{P2G,min} \leq P_{P2G,t} \leq P_{P2G,max} \quad (10)$$

式中, $P_{P2G,t}$ 为 t 期间电气气体装置的负载能力; $P_{P2G,t}$ 的上限和下限分别为 $P_{P2G,max}$ 和 $P_{P2G,min}$ 。

5) 天然气供应限制了模型的负载, 应对其进行限制

$$F_{N,j,min} \leq F_{N,j,t} \leq F_{N,j,max} \quad (11)$$

式中, $F_{N,j,t}$ 为气体源点 t 处的气体流速; $F_{N,j,t}$ 上下限度分别是 $F_{N,j,max}$ 和 $F_{N,j,min}$ 。

6) 天然气管道输送量会影响模型运行成本, 应对其进行限制

$$F_{p,min} \leq F_{p,ab} \leq F_{p,max} \quad (12)$$

式中, $F_{p,ab}$ 是天然气管道输送流量; $F_{p,min}$ 和 $F_{p,max}$ 是输送流量的下边界和上边界。

3. 基于综合需求响应实现虚拟电厂综合能源调度优化

综合需求响应是一种随机调度和优化方法, 具有简单、通用、稳定性强和全局优化性好等优点, 在优化综合能源模型方面有很好的应用前景。总体需求响应模拟了一种自然的生物发展机制, 本质上是一种有效的全局搜索方法, 可以自动获取和积累搜索区域过程的知识, 从而获得问题的最优解。运用综合需求响应解决虚拟电厂综合能源调度优化问题, 调度优化基本流程如图2所示。

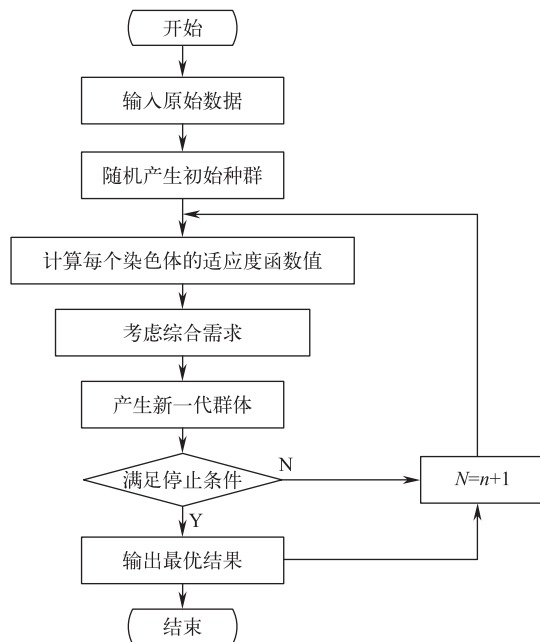


图2 基于综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化基本流程

1) 输入原始数据, 设置种数据大小、转换率、突变率和最大重复次数等参数。

2) 计算所有数据的对应关系, 即每个数据目标函数的值。

3) 进行上一代群体选择、杂交和突变操作, 在新一代群体中创建、替换和保存具有高顺应功能的

个体。

- 4) 确定是否已满足停止条件。如果满足则提取最优解；如果不满足，则转到重新计算的步骤。
- 5) 输出最优解并结束。

实验论证

为验证考虑综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化方法在能源调度上的优势，设置了传统方法1和传统方法2作为对照组进行对比实验。

1. 实验准备

为了验证所提方法的规划性和有效性，使用MATLAB软件建立实验微网络结构。模拟参数确定为：微电网结构中风电和太阳能发电的标称功率为600 MW，负载容量为100 MW，燃气装置的最大功率转换容量为500 MW，种群数量为120个，最大重复次数为240次。在优化过程中，规定的方法必须由调度值确定，设置该值将影响集成能源微网络的编程结果。使用功效作为测量调度值3。为了验证本文所提方法优化的效果，对比三种方法获得了优化前后的全能量输出。由于空间有限，只能反映能源供应和热量输出的规划结果：结果为正数，则表示能量供应；结果为负值，表示能量损失。不同调度方法下能源之间转化效率对比见表1。

2. 对比实验

表1 不同调度方法下能源之间转化效率对比

调度方法	电气转化效率	光伏转化效率	天然气转化效率
传统方法1	89.7	93.1	95.5
传统方法2	87.9	90.5	96.9
本文方法	97.6	98.9	99.5

从上表可以看出，本文研究方法综合能源调度转换效率比传统方法1和传统方法2分别平均高出7.2%。实验结果表明，使用本文方法下的能源之间转化效率最高，能够最大限度地利用综合能源。

结束语

综合能源微电网的充分利用，可以提高节能减排对电力模型的影响，但综合能源微电网在不同能源中的冲突是由无法最大限度地增加不同能源指标使用的程度导致的。因此，本文提出了一种考虑综合需求响应的虚拟电厂综合能源调度优化方法，考虑网络限制和临时不确定性，建立了虚拟电厂综合能源模型，并计算了效率的目标函数，分析了规划过程中未定义的参数，以获得严格的优化结果。测试结果表明，本文提出的方法可以降低微网络中的总能量损失，最大限度地提高集成能源之间的协同效应，提高转换能力，更好地规划集成能源之间的转换，确保最大限度地利用综合能源。EA

参考文献

[1] 吴洋，苏承国，孙映易，等．现货市场环境下水电富集电网日前优化调度研究[J]．人民长江，2023，54(7)：210-217，233．

[2] 蒋玮，单沫文，邓一帆等．虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市场的优化调度策略[J]．电力工程技术，2023，42(4)：13-22，240．

[3] 孙一凡，许子芸，王林．计及多时间尺度灵活性的电-气互联系统优化调度方法[J]．浙江电力，2023，42(7)：9-17．

[4] 曹紫霖，王文静，赵薇，等．考虑需求响应的负荷密集区分布式综合能源系统优化调度研究[J]．综合智慧能源，2023，45(7)：11-21．

[5] 付江凤，张代青，张惠，等．基于能值分析的漫湾水库生态服务价值优化调度[J]．水电能源科学，2023，41(7)：94-97．

[6] 刘宏亮，李琦，程雅雯，等．计及分时电价的风光氢储互补综合系统日前优化调度[J]．东北电力技术，2023，44(07)：1-6，14．

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告