

· 专论与综述 ·

能源互联网多源多层次协调优化方法研究

代贤忠¹, 韩新阳¹, 董益华², 罗海华², 李钰^{3,4}

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 2. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121; 3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 4. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

摘要:能源互联网已经成为分布式设备智能化管理, 多种形式能源耦合互补应用的关键技术。为了解决能源互联网中的多能协调优化问题, 文中针对含可再生能源的能源互联网, 按照“分层控制-协同优化”的思想, 提出一种多源多层次的调度层级划分模型对系统内的分布式设备进行管理, 实现区域系统内冷、热、电、气等能源的优化调度。文中采用基于实数编码的遗传算法对该优化模型进行仿真分析, 验证了该分层优化方案能够以最小成本为优化目标实现区域能源互联网能量自治及多能优化, 同时协调不同区域间的优化调度。

关键词:能源互联网; 分布式设备; 可再生能源; 分层优化; 遗传算法

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)02-0001-09

0 引言

经济的飞速发展带来了严重的能源和生态危机, 而发展清洁可再生能源, 改善能源结构, 提高能源利用效率为解决能源危机提供了有效手段^[1-4]。可再生能源技术日渐成熟, 其在电网中的渗透率越来越高, 但是在接入大电网时会对电力系统的安全稳定运行和电能质量的管控造成一定的冲击^[5]。第三次工业革命催生的能源互联网为解决分布式可再生能源的规模化应用问题提供了行之有效的解决思路。但其能量管理系统面临着大规模决策变量的处理难题, 电、气、冷、热多能流的联合调度协调优化以及综合能效的提高面临挑战。

文献[6]建立了基于能源中心的电-气-热混联能源系统模型; 文献[7]基于能量枢纽热电比可调模型建立了微能源网的双层优化模型; 文献[8]建立了风光水火多能基地联合调度模型。以上文献都强调能源互联网中多能互补综合应用与系统协调优化控制。文献[9-10]讨论了能源互联网多能协调优化的体系架构设计及其相关运营控制策略; 文献[11]建立去中心化的分层调度模型, 采用自适应进化算法作为优化问题的求解手段; 文献[12]基于随机模型预测控制的能源局域网优化调度方法, 采用混合整数二次规划对系统模型进行优化协调; 文献[13]基于多智能体的的一致性, 提出实现能源

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707116); 国家电网有限公司总部科技项目“适应全球能源互联网发展的智能电网软连接机制与模型研究”

互联网中多能互补与系统协调优化控制的双层控制模型。因此能源互联网优化模型的建立与协调策略的选择是一直以来的研究热点。

结合能源互联网的研究现状, 文中从能源互联网的基本概念出发, 在空间尺度上将能源互联网分为系统层, 区域层和设备层, 根据不同的调度主体设立了不同的优化目标, 实现一种“分层控制-全局优化”的多级控制模式。文中针对提出的优化调度模型, 基于遗传算法提出求解方案。通过 Matlab 仿真验证了分层优化调度的方式能有效解决系统中分布式设备的管控问题。

1 能源互联网调度层级设计

1.1 分层优化架构

能源互联网的分布式特性下分布式设备数量剧增, 优化调度决策需要分析处理海量数据, 对传统的统一集中调度方式提出新要求。分层优化是针对非线性高维问题及海量数据处理难题的解决策略, 其基本思路是将系统按照一定标准(如电压等级)划分为若干层次, 再按照系统物理特征划分为不同的区域, 给每个区域分配一个代理负责分布式设备的调控。风光等分布式电源、冷热等负荷需求具有地域集中的特点, 按区域建立局域能源互联网实现能量自治, 由上级调度统一协调优化, 该分层控制在空间或物理层面接近系统功能层次的划分, 有利于调度架构的设计与集成。

1.2 能源互联网调度层级总体设计

文中研究的能源互联网接入配电网, 基于上述分层优化架构按照“分而治之”的思想在空间尺度

上将能源互联网分为3个层级:系统层、区域层和设备层^[13],其分层架构如图1所示。

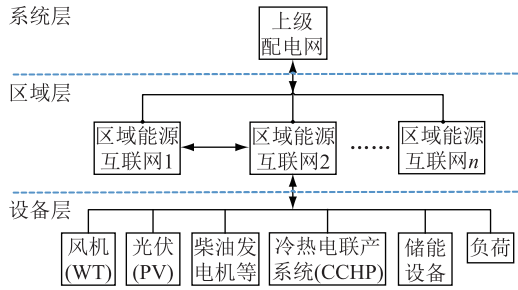


图1 能源互联网分层架构

Fig.1 Layered architecture of energy internet

系统层的主要功能是负责各个区域能源互联网之间的相互协调及区域能源互联网与上级配电网之间的交互实现整个能源互联的安全、经济运行。

区域层包含若干互联的区域能源互联网,其主要功能是协调区域内部各可控分布式电源出力,最小化区域运行成本,实现区域的能量自治。

设备层包含风机(wind turbines, WT)、光伏(photovoltaics, PV)、分布式发电机(distributed generation, DG)、蓄电池(batteries)、冷热电联产(combined cooling, heating and power, CCHP)系统等形式多元化的能源设备。设备层主要负责设备的启停、自身运行状态的调控,具有上报自身参数、响应上层下发的指令等功能。

2 能源互联网多源多层次优化调度模型

2.1 系统层优化调度模型

针对图1所示的能源互联网,建立系统层优化调度模型,其优化调度的目标是使系统的总运行成本最小,目标函数的数学表达如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N f(P_n(t)) + f(P_{\text{grid},n}(t)) \quad (1)$$

式中: T 为调度周期; N 为区域能源互联网数量; $P_n(t)$ 为区域 n 的总发电功率; $P_{\text{grid},n}(t)$ 为区域 n 与配电网的交换功率,为正表示区域 n 向配电网售电,为负表示从配电网购电。

$$f(P_n(t)) = a_n P_n(t)^2 + b_n P_n(t) + c_n \quad (2)$$

$$f(P_{\text{grid},n}(t)) = \alpha_n P_{\text{grid},n}(t)^2 + p(t) P_{\text{grid},n}(t) \quad (3)$$

式中: $f(P_n(t))$ 为区域能源互联网 n 的发电成本。将每个区域等效为一个发电单元,其发电成本与区域总发电功率之间成二次函数关系^[14], a_n, b_n, c_n 为区域发电成本系数。 $f(P_{\text{grid},n}(t))$ 为交换功率成本,其中传输成本与交换功率成二次函数关系, α_n 为传输成本系数; $p(t)$ 为电价。

系统层的优化变量是区域发电总量以及区域与配网的交换功率,因此需要考虑的约束条件有区域能源互联网总出力上下限、功率平衡、联络线约束,详细约束参见文献[15]。

2.2 区域层优化调度模型

区域优化调度的目标是合理调控各可控机组设备出力,从而实现区域运行成本最小,每个区域的目标函数为:

$$\min C_{\text{area},n} = \sum_{t=1}^T [C_{\text{WT}}(t) + C_{\text{PV}}(t) + C_{\text{DG}}(t) + C_{\text{CCHP}}(t)] \quad (4)$$

式中: $C_{\text{area},n}$ 为区域能源互联网 n 的总运行成本;等式右侧4个变量分别为风光发电成本,可控分布式电源发电成本,CCHP系统的供热和供电成本总和。

对每个区域能源互联网,区域层优化调度模型需要满足区域功率平衡,包括电功率和热功率平衡。

(1) 风光发电成本。仅考虑风光设备其日常运行维护成本:

$$C_{\text{WT}}(t) = \alpha_{\text{WT}} P_{\text{WT}}(t) \quad (5)$$

$$C_{\text{PV}}(t) = \alpha_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t) \quad (6)$$

式中: $\alpha_{\text{WT}}, \alpha_{\text{PV}}$ 为单位风光发电量运维成本系数。

(2) 可控机组发电成本及约束。可控机组通常采用二次函数模型表示成本:

$$C_{\text{DG}}(t) = \sum_{i=1}^I [a_{\text{DG},i} P_{\text{DG},i}(t)^2 + b_{\text{DG},i} P_{\text{DG},i}(t) + c_{\text{DG},i}] \quad (7)$$

式中: $P_{\text{DG},i}(t)$ 为第 i 台机组的输出功率; $a_{\text{DG},i}, b_{\text{DG},i}, c_{\text{DG},i}$ 为该可控机组的成本系数。

可控发电机组在运行过程中受到机组技术参数的限制,需考虑其出力上下限及爬坡能力的约束。

(3) 蓄电池储能成本及其约束。蓄电池在运行过程中仅考虑其运维成本:

$$C_{\text{BESS}}(t) = C_{\text{inv}} \frac{P_{\text{ch}}(t) + P_{\text{dis}}(t)}{L(t)} \quad (8)$$

式中: C_{inv} 为初始投资建设费用; $P_{\text{ch}}(t), P_{\text{dis}}(t)$ 分别为充放电功率; $L(t)$ 为蓄电池使用寿命。蓄电池的运行过程中主要考虑荷电状态和充放电功率的约束。

(4) 冷热电联供系统成本及约束。冷热电联供系统结构如图2所示,成本主要是天然气燃料成本 C_{fuel} ^[16],包含微型燃气轮机(micro-turbines, MT)和燃气锅炉(gas boiler, GB)二者的燃料成本:

$$C_{\text{fuel}} = C_{\text{MT}} + C_{\text{GB}} \quad (9)$$

$$C_{\text{MT}} = c_g F_{\text{MT}} \quad (10)$$

其中:

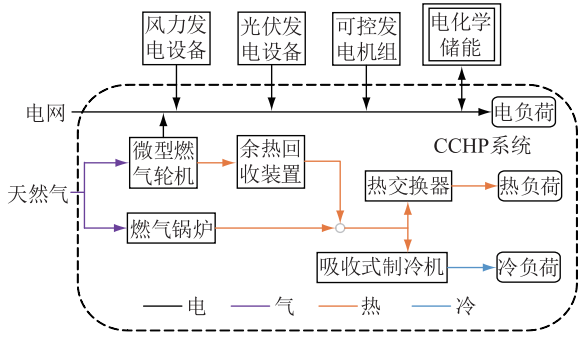


图2 冷热电联供系统结构

Fig.2 Structure of CCHP system

$$F_{MT} = \frac{E_{MT}}{Q_{LHV}\eta_{MT,t}} = \frac{P_{MT}(t)\Delta t}{Q_{LHV}\eta_{MT,t}} \quad (11)$$

式中: C_{MT} 为 MT 的燃料成本; C_{GB} 为燃气锅炉的燃料成本; c_g 为天然气价格; F_{MT} 为 MT 的天然气耗量; E_{MT} 为 MT 在 Δt 时间内提供的能量; Q_{LHV} 为天然气热值; $\eta_{MT,t}$ 为 MT 在 t 时刻的发电效率, 与 MT 的型号有关, 通常采用三阶效率模型^[17]。

电热转换过程中存在漏热损失, 用电热转换系数 η_{CCHP} 表示这种损失^[18]。

$$P_{MT}(t) = \frac{H_{MT}(t)}{\eta_{CCHP}} \quad (12)$$

对燃气锅炉, 其产热也与效率有关, 二者共同决定了燃料成本^[19]:

$$C_{GB} = c_g F_{GB} \quad (13)$$

$$F_{GB} = \frac{Q_{GB}}{Q_{LHV}\eta_{GB}} = \frac{H_{GB}(t)\Delta t}{Q_{LHV}\eta_{GB}} \quad (14)$$

式中: F_{GB} 为 GB 的天然气耗量; Q_{GB} 为 Δt 时间内的产热量; $H_{GB}(t)$ 为在 t 时刻的热/冷功率输出; η_{GB} 为产热效率。

MT 发电过程中会产生高温烟气, 热回收系统将烟气热量回收利用以冷热功率的形式输出。当 MT 提供的热量大于冷热负荷需求时, 多余的热量以热形式耗散在空气中; 当 MT 提供的热量不足时, 冷热功率缺额由 GB 补足^[20]。

冷热电联供系统运行过程中, 需要考虑燃气轮机、燃气锅炉的热、电功率出力约束。

由于篇幅所限, 且已有相关研究成果, 文中上述电、热功率平衡, 可控发电机组、蓄电池、燃气轮机、燃气锅炉等设备详细约束可参见文献[10, 15, 18, 21]。

2.3 系统层与区域层的交互

在上文建立的能源互联网多源多层次优化调度模型中, 系统层与区域层都具有各自的目标函数、优化决策变量和约束条件, 二者通过区域总发

电功率 $P_n(t)$ 联系起来。系统层与区域层之间需要进行必要的信息交流, 共同完成整个系统的优化调度, 其交互流程如图3所示。系统层按照系统总发电成本最低的目标, 使用遗传算法对各个区域能源互联网总出力进行优化求解, 随后将各区域总发电功率下发至区域层。各个区域根据系统层下发的区域总发电功率, 采用集中式优化方法配置各分布式设备的出力并计算各个区域的发电成本系数, 判断是否需要将系数反馈至系统层进行更新。

需要说明的是, 文中在区域层以微型燃气轮机的电出力以及燃气锅炉的热出力作为优化决策变量, 通过调度区域能源互联网中的 MT、GB 以及热交换器、吸收制冷机等设备, 在局域冷、热、电多能耦合的情况下实现联合优化调度。由于冷、热形式的能源传输损耗大, 存在无法进行大规模、远距离的传输的局限性, 文中的系统层选择区域总发电功率(而不涉及冷、热变量)作为优化决策变量, 将多个能源系统联系起来, 从而协调优化实现能量的远距离跨区耦合, 同时以损耗较小的传输形式节约成本。

(1) 区域发电成本系数更新规则^[13]。根据式(2), 区域能源互联网的总发电成本系数为 a_n, b_n, c_n 。记区域内当前边际成本系数较小的发电机组成本系数为 $a_{DG,i}^{\min}, b_{DG,i}^{\min}$ 。

当区域能源互联网的总发电量 $P_n(t)$ 变化时, 对区域内部而言由边际成本最小的可控机组对变化作出响应, 因此可令整个区域的边际成本与该机组的边际成本相等, 以此保持系统层与区域层之间的交互关系在成本上的一致性。区域能源互联网的发电成本系数更新规则为:

$$a_n = a_{DG,i}^{\min} \quad (15)$$

$$b_n = 2a_{DG,i}^{\min}P_n(t) + b_{DG,i}^{\min} - 2a_{DG,i}^{\min}P_{DG,i}(t) \quad (16)$$

(2) 系统层与区域层交互迭代停止准则。当区域能源互联网的总发电功率变化量满足式(17)或者达到最大迭代次数时, 迭代停止。

$$\Delta P_n \leq \varepsilon \quad (17)$$

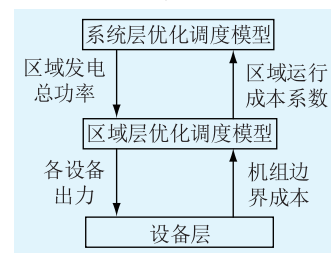


图3 能源互联网系统层和区域层与设备层交互框架
Fig.3 Interaction framework of energy internet between system layer, regional layer and device layer

3 基于遗传算法的优化调度仿真流程

3.1 遗传算法简介

遗传算法基于生物在进化过程中体现出的自然朴素的寻优思想,以初始化种群为起点,通过选择、交叉和变异等遗传算子的作用,逐代进化搜索优化问题的最优解^[22]。种群由经过编码的个体组成,每个个体对应着优化问题可行域中的一个候选解,因此种群是若干可行解组成的解集。在进化过程中,适应度函数是评价衡量个体优劣程度的标尺,通常适应度大的个体映射到解空间的候选解更接近最优解,将会被保留下来参与下一代的遗传进化;适应度小的个体将被淘汰^[23]。

假设能源互联网区域层被分为 N 个区域,优化调度周期为 T 。建立种群规模为 M 的种群,采用实数编码策略对种群进行编码:

$$X_m = \begin{cases} X_{11}X_{12}X_{13}\dots X_{1T} \\ X_{21}X_{22}X_{23}\dots X_{2T} \\ \dots \\ X_{N1}X_{N2}X_{N3}\dots X_{NT} \end{cases} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

种群中某个个体 X_m , 包含 N 条染色体, 每条染色体上存在 T 个等位基因。其本质是这 N 条染色体分别代表着 N 个区域; 染色体上的某个基因 X_n 是一个实数, 表征着区域 n 在 t 时刻的总发电功率。对某个个体编码后, 该个体包含了每个区域的在每个时刻出力的全部信息。

由于分层调度模型中决策变量数目巨大, 在进化寻优的过程中, 交叉变异操作的随机性和罚函数惩罚项的作用, 可能对适应度的值产生较大影响, 较为优秀的个体可能仅仅因为某一代的操作被迅速淘汰。因此文中采用基于父子排序选择的精英选择策略。在每一代的进化过程中, 交叉、变异操作前的种群称为父群, 操作后的群体称为中间群体。将父群和中间群体合并为一个种群对个体按照适应度进行降序排列, 选择算子将适应度最高的 M 个 (M 为种群规模) 个体挑选出来作为子代, 同时保留了父群和子群中的优秀个体, 规避了依赖随机数选择策略的陷入局部最优的可能性。

在文中提出的模型中, 系统层遗传算法中的适应度函数映射为其优化目标式(1); 而区域层的适应度函数映射为优化目标式(4), 均为最小值优化问题, 由于目标函数的值在可行域内均为正值, 因此取其倒数将最小问题转化为最大问题。

3.2 基于遗传算法的求解流程

基于遗传算法的基本理论, 将其运用到能源互

联网多源多层次的优化调度策略的求解中去, 求解流程如图 4 所示。

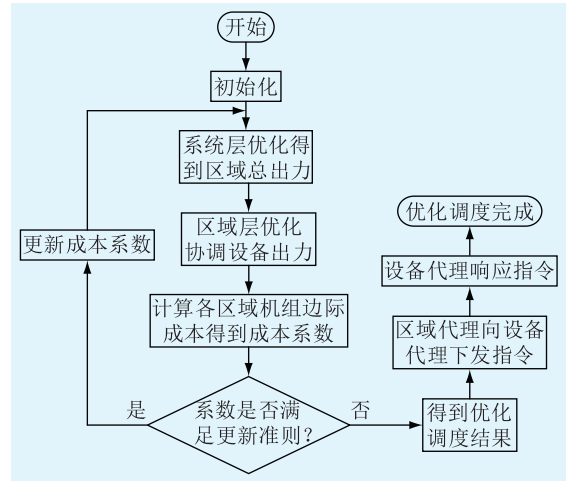


图 4 能源互联网优化调度模型求解流程

Fig.4 Solution process of optimization scheduling model for energy internet

(1) 开始, 初始化数据。需要初始化的参数包括区域发电成本系数、区域出力上下限、风光出力预测、各区域电力负荷和热力负荷需求、区域内各设备成本系数、技术与容量约束等。

(2) 开始系统层优化。根据遗传算法流程对系统层优化调度模型进行求解。进化算法完成后得到各个区域的总发电功率 $P_n(t)$ 与配电网交换功率 $P_{grid,n}(t)$, 并将 $P_n(t)$ 下发至各区域。

(3) 开始区域层优化。根据系统层下发的区域总发电功率, 按照区域运行成本最小的目标协调区域内各设备出力, 得到区域层的分布式设备协调结果。

(4) 优化终止判断。根据区域优化结果计算发电机组边际成本, 由式(15)和式(16)得到下一轮迭代中可能用到的成本系数。根据式(17)判断是否需要进行系数更新。若不满足迭代停止条件, 则回到步骤(2); 满足停止迭代条件, 优化过程结束, 进入步骤(5);

(5) 输出优化结果。经过迭代优化得到系统层和区域层的优化结果, 区域层按照该结果向设备发出调度指令, 设备响应指令完成系统的优化调度。

4 算例分析

4.1 算例参数

按照如图 1 所示的能源互联网分层架构, 建立包含 4 个区域能源互联网的系统, 如图 5 所示, 各区域与配网联络线的最大交换功率为 100 kW。

文中采用实数编码的遗传算法, 种群规模为

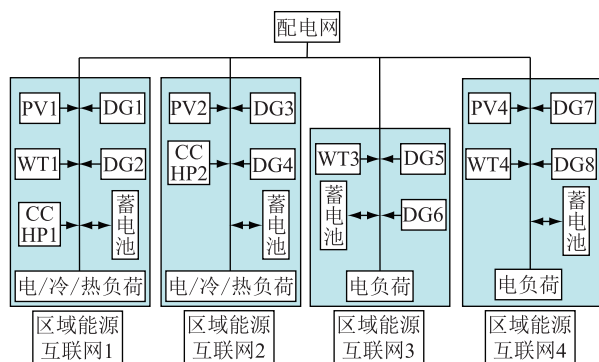


图5 能源互联网架构

Fig.5 Framework of energy internet

60,最大迭代次数150,惩罚因子 ρ 初始化为0.1。各区域能源互联网风光出力预测、电、冷、热负荷预测,各区域机组容量配置及分布式可控发电机组设备参数详情见附录。 c_g 为0.5164美元/ m^3 ,其 Q_{LHV} 取9.7($kW \cdot h$)/ m^3 。MT的电热转换系数为0.88。

4.2 仿真结果

4.2.1 系统层优化调度结果

各区域能源互联网的总发电功率如图6所示,各区域与上级配电网交换的功率如图7所示。当区域边际成本大于电价时,区域从配网购电;当区域边际成本小于电价时,区域向配网售电。

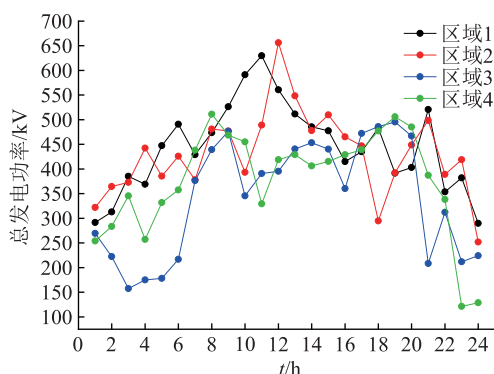


图6 各区域能源互联网总发电功率优化结果

Fig.6 Optimization results of total power generation for each regional energy internet

根据图7的优化结果。由于区域3的发电成本较小,因此其与上级配电网的交换功率大于0的时刻更多,区域3通过向配网售电获取利润;而区域2和区域4的发电成本较高,主要从配网购电。各区域可以通过公共母线进行能量交互。由于遗传算法在寻优过程中具有一定的随机性,联络线功率流向与理论流向不完全相同,但在完整的调度周期内,区域购售电行为的趋势与理论分析结果符合。

4.2.2 区域层优化调度结果分析

区域能源互联网1代表典型冬季能源互联网系统的优化调度结果。在冬季,昼夜温度较低时热负

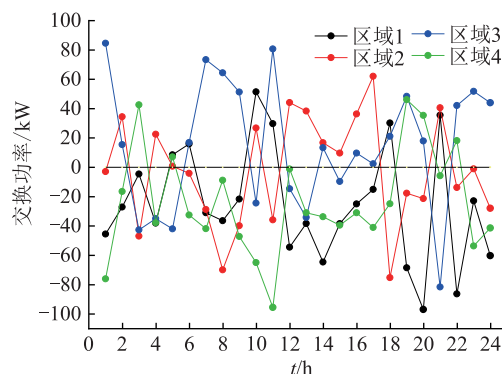


图7 各区域能源互联网与配网交换功率

Fig.7 Optimization results of exchange power between regional energy internet

荷大,白天热负荷较小;冷负荷波动不大。区域优化调度仿真结果如图8和图9所示。图8主要表示系统内电能的供需关系;图9主要表示热能的供需关系。从图中可以看出,除10:00—17:00以外,微型燃气轮机一直处于满发状态。这是由于微型燃气轮机的发电成本最低,在电力网络中MT尽可能多发电来满足其电力需求;但是MT的出力同时也受到热力网络的约束,在10:00—17:00时段内热量需求骤然下降,MT必须减小出力以满足热量的供需平衡。若此时MT仍旧保持满发状态,虽然与其他机组相比发电成本更低,但是在发电过程中产生多余的热量最终耗散在空气中,造成能源的浪费。

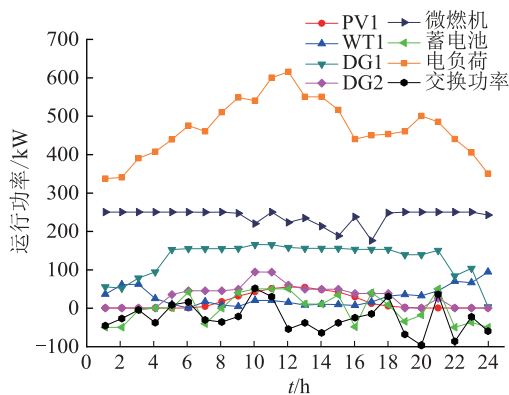


图8 区域1电力网络优化结果

Fig.8 Power optimization results of region 1

在电力网络中,由于0:00—5:00电负荷较小,MT满发的情况下不足的电量由成本较低的机组1和蓄电池放电补足,发电成本较高的机组2不发电。随着负荷逐渐增大,机组1和机组2按照等耗量微增率原则分配出力。蓄电池主要在负荷较小的凌晨和夜间进行充电,在负荷较大的8:00—14:00时进行放电,起到削峰填谷的作用。由于区域1的发电机组成本比较高,因此区域1大部分时段从配网购入部分电量供给给用户以减小经济成本。

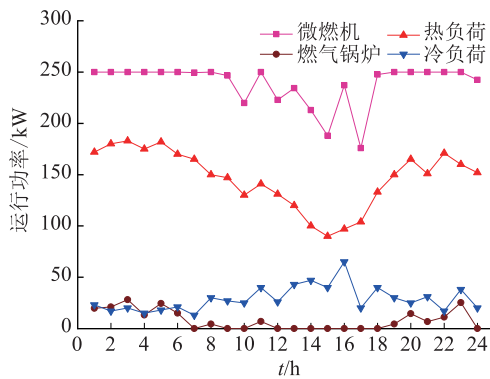


图9 区域1热力网络优化结果

Fig.9 Thermal optimization results of region 1

热力网络中0:00—8:00、17:00—24:00热负荷大,MT保持满发仍不能满足冷热负荷需求,此时燃气锅炉启动补足热力负荷的缺额。11:00—18:00热负荷急剧减小,此时MT减小出力,GB停运保证热力网络中的能量平衡,冷负荷的变化由MT跟随。

区域能源互联网2代表典型夏季能源互联网系统的优化调度结果。在冬季,中午温度高时冷负荷大,昼夜冷负荷较小。区域优化调度仿真结果如图10和图11所示。可知热力网络中0:00—8:00和21:00—24:00时段内冷负荷较小,MT主要根据冷热负荷需求安排出力,其输出功率随着冷热负荷的变化而变化。从8:00开始冷负荷剧增,此时MT满发仍旧不能满足冷负荷需求,因此启动GB补足热量缺额,冷热负荷主要由GB跟随。与区域1相比,电力负荷相对平缓但波动较大。机组1和机组2按照等耗量微增率原则分配出力。负荷波动主要由蓄电池平抑,在负荷高峰充当电源放电;在负荷低谷充当负荷进行充电。由于区域2的发电成本系数较高,因此区域2在负荷高峰时通过从配网购电,保证区域的总运行成本最低。

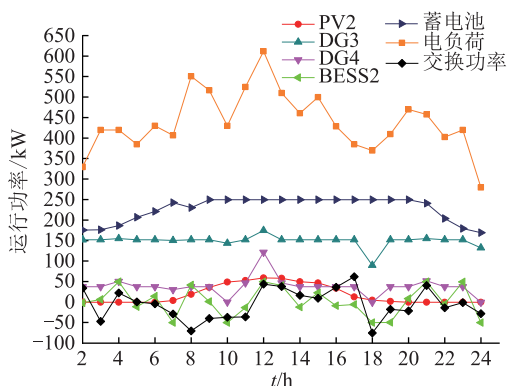


图10 区域2电力网络优化结果

Fig.10 Power optimization results of region 2

区域3和区域4的仿真结果如图12和图13所

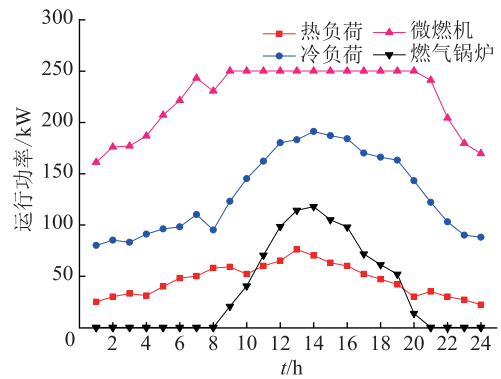


图11 区域2热力网络优化结果

Fig.11 Thermal optimization results of region 2

示。在区域3中,0:00—6:00和21:00—24:00负荷较小,此时成本较高的机组6不运行,机组5单独运行给负荷供电;6:00—21:00时负荷较大,此时2台机组按照等耗量微增率原则分配出力。蓄电池在负荷低谷充电,在负荷高峰放电,有效跟随了负荷的变化,起到了削峰填谷的作用。区域4的结果分析与区域3类似,不再赘述。

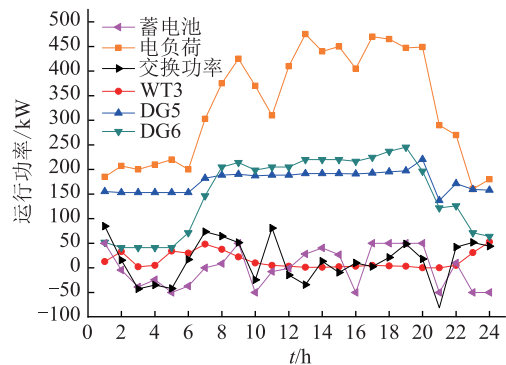


图12 区域3优化调度结果

Fig.12 Optimization results of region 3

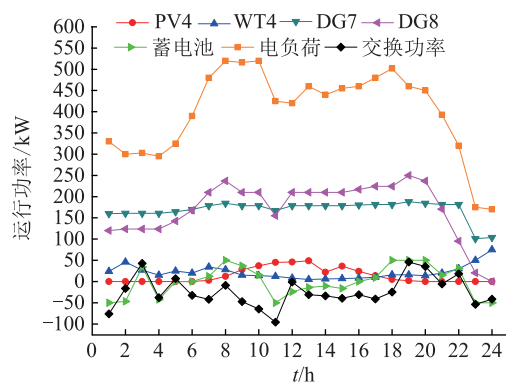


图13 区域4优化调度结果

Fig.13 Optimization results of region 4

4 结论

文中主要研究含可再生能源的能源互联网多

元多层次协调优化方法,建立了“系统层-区域层”两层分层优化调度模型,系统层负责全网范围的优化调度,区域层在响应系统层优化结果的基础上实现能量的区域自治。通过仿真分析可以得到以下结论:

(1) 在区域能源互联网内,分布式可再生清洁能源,如风机光伏设备等工作在最大功率跟踪点模式,应尽可能优先得到消纳;

(2) 光伏消纳后不足的缺额由可控设备补足,基于实数编码的遗传算法利用进化寻优思想找到使区域成本最小的优化协调策略。

(3) 多层次协调优化模型为大规模决策变量的处理提供了有效的解决方案,通过对物理系统的架构设计实现对能源互联网中分布式设备的管控。

能源互联网多源多层次的优化调度有利于实现高渗透率可再生能源的本地化消纳,提高能源的综合利用效能。

参考文献:

- [1] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [2] 杨英仪. 面向能源互联网的数据一致性框架[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 22-28.
YANG Yingyi. A data consensus framework for energy internet [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 22-28.
- [3] 金艳鸣, 谭雪, 焦冰琪, 等. 基于可计算一般均衡模型的全球能源互联网经济社会效益分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 1-7.
JIN Yanming, TAN Xue, JIAO Bingqi, et al. Study on economic and social benefits of global energy internet based on computable general equilibrium model[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 1-7.
- [4] 夏彦辉, 董宸, 李鹏, 等. 一种基于天然气发电的园区能源互联网构建方案[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 19-23.
XIA Yanhui, DONG Chen, LI Peng, et al. Construction scheme for park energy internet based on natural gas power generation [J]. Smart Power, 2017, 45(11): 19-23.
- [5] 竺庆茸, 黄文杰, 徐修华, 等. 分布式能源对主动配电网谐波特性影响的研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 93-97, 108.
ZHU Qingrong, HUANG Wenjie, XU Xiuhua, et al. Research on the influence of distributed energy on harmonic characteristics of active distribution network [J]. Power System Technology, 2017, 36(5): 93-97, 108.
- [6] 施锦月. 基于能量枢纽热电比可调模型的微电网双层优化方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
SHI Jinyue. Bi-level optimization method for Energy Micro-grid based on the heat-to-electric ratio adjustable mode of energy hub [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [7] 夏新华, 高宗和, 李恒强, 等. 考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 59-65.
XIA Xinhua, GAO Zonghe, LI Hengqiang, et al. Combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases considering the time-space complementary characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 59-65.
- [8] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. Generation-grid-load-storage coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [9] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3667-3677.
SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [10] ZHANG F X, ZHANG T, WANG R. Optimizing Hierarchical power distribution of multiple local energy network systems in grid-connected mode [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017, 26(5): 1981-2000.
- [11] 张彦, 张涛, 刘亚杰, 等. 基于随机模型预测控制的能源局域网优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3451-3462.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Stochastic model predictive control for energy management optimization of an energy local network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3451-3462.
- [12] 郝然, 艾芊, 朱宇超. 基于多智能体一致性的能源互联网协同优化控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 10-17, 57.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao. Multi-time scale voltage control and coordinated correction for distributed networks considering load characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 10-17, 57.
- [13] 蒲天骄, 刘克文, 李焱, 等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1864-1874.
PU Tianjiao, LIU Kewen, LI Ye, et al. Multi-agent system based simulation verification for autonomy cooperative optimization control on active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1864-1874.
- [14] 崔林, 唐沂媛. 冷热电联供型微电网优化运行及敏感性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 138-143.
CUI Lin, TANG Qiyuan. Optimal operation sensitivity analysis of the combined cooling, heating and power microgrid [J]. Power System Technology, 2017, 36(6): 138-143.
- [15] 王皓, 艾芊, 吴俊宏, 等. 基于交替方向乘子法的微电网群双层分布式调度方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6):

1718-1727.

WANG Hao, AI Qian, WU Junhong, et al. Bi-level distributed optimization for microgrid clusters based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2018,42(6): 1718-1727.

- [16] 季阳. 基于多代理系统的虚拟发电厂技术及其在智能电网中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.

JI Yang. Multi agent system based control of virtual power plant and its application in smart grid [D]. Shanghai : Shanghai Jiaotong University,2011.

- [17] 郭帅,刘鲁嘉,杨萌,等. 计及可控负荷的微网自治调度模型[J]. 电网技术,2017,41(1):48-56.

GUO Shuai, LIU Lujia, YANG Meng, et al. Autonomous scheduling model for microgrid considering controllable loads [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 48-56.

- [18] 熊焰,吴杰康,王强,等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(14):3616-3625.

XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, pv, gas and energy storage [J]. Proceedings of the CSEE,2015, 35(14): 3616-3625.

- [19] 邓莉荣,孙宏斌,陈润泽,等. 面向能源互联网的热电联供系统节点能价研究 [J]. 电网技术, 2016, 40 (11): 3375-3382.

DENG Lirong, SUN Hongbin, CHEN Runze, et al. Research on nodal energy price of combined heat and power system for energy internet [J]. Power System Technology, 2016, 40 (11): 3375-3382.

- [20] 施锦月,许健,曾博,等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行 [J]. 电网技术,2016,40(10): 2959-2966.

SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode [J]. Power System Technology, 2016, 40 (10): 2959-2966.

- [21] 周任军,康信文,李绍金,等. 冷热电联供系统能量流函数及运行策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):1-5.

ZHOU Renjun, KANG Xinwen, LI Shaojin, et al. Energy flow function and operational strategy of CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 1-5.

- [22] 王高红,陈潇一. 基于遗传算法的智能电网非侵入式电器监控策略[J]. 智慧电力,2017,45(11):42-46.

WANG Gaohong, CHEN Xiaoyi. Monitoring strategy with non-invasion for electric appliances in smart grid based on genetic algorithm[J]. Smart Power,2017,45(11):42-46.

- [23] 张琛,詹志辉. 遗传算法选择策略比较[J]. 计算机工程与设计,2009,30(23):5471-5474,5478.

ZHANG Chen, ZHAN Zhihui. Comparisons of selection strategy in genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(23): 5471-5474,5478.

作者简介:



代贤忠

代贤忠(1986),男,博士,高级工程师,从事大电网安全运行分析与控制、电网发展规划、智能电网、电动汽车与充电网络等方面的研究工作(E-mail:happydxz1@126.com);

韩新阳(1972),男,硕士,高级工程师,从事电力市场分析预测、电力需求侧管理、电力市场营销、电力规划等研究工作;

董益华(1979),男,硕士,高级工程师,从事综合能源系统集成及节能优化研究工作。

附录 A

算例参数

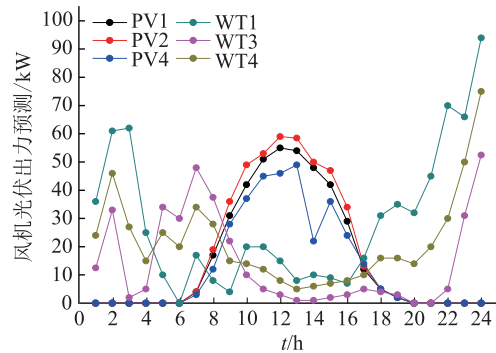


图 A1 各区域能源互联网风光出力预测

Fig.A1 Forecast of PV and WT output of each region

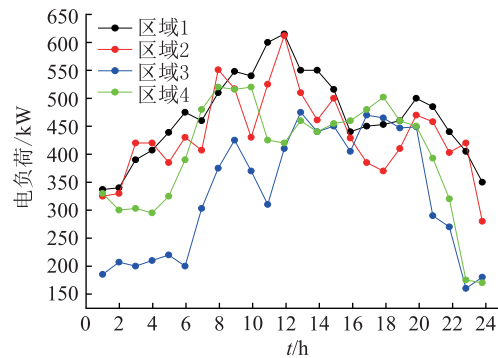


图 A2 各区域能源互联网电负荷曲线

Fig.A2 Power load curve of each region

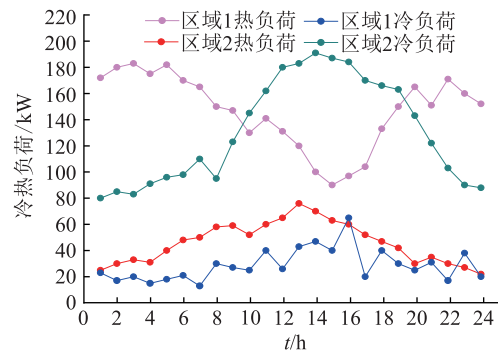


图 A3 各区域能源互联网冷热负荷曲线

Fig.A3 Cooling and heating load curves of each region

表 A1 各区域能源互联网的机组容量
Table A1 Capacity of WT, PV, DG, MT and battery

区域能源互联网	风机/kW	光伏/kW	分布式可控发电机组/kW		MT/kW	蓄电池/(kW·h)
			DG1/kW	DG2/kW		
A1	120	60	250	250	150	400
A2	0	70	300	250	150	400
A3	80	0	300	250	0	400
A4	100	50	300	250	0	400

表 A2 分布式可控发电机组参数
Table A2 Parameters of controllable unit

区域能源互联网	可控发电机组	最小出力/kW	最大出力/kW	R_{up}/R_{down}	a_{DG}	b_{DG}	c_{DG}
A1	DG1	0	250	100/100	0.014 1	16.758 3	6.78
	DG2	0	250	75/75	0.003 1	20.837 5	28
A2	DG3	0	300	100/100	0.013 1	15.465	6.78
	DG4	0	250	75/75	0.002 9	19.234 6	28
A3	DG5	0	300	100/100	0.012	14.176 3	6.78
	DG6	0	250	75/75	0.002 6	17.631 8	28
A4	DG7	0	300	100/100	0.016 3	18.042 5	6.78
	DG8	0	250	75/75	0.003 4	22.440 4	28

表 A3 区域能源互联网蓄电池参数
Table A3 Parameters of battery unit

区域能源互联网	蓄电池	$S_{SOC,min}$	$S_{SOC,max}$	P_{dis}^{max}	P_{ch}^{max}	η_{ch}/η_{dis}	δ
A1	BESS1	0.2	0.9	50	50	0.98/0.98	0
A2	BESS2	0.2	0.9	50	50	0.98/0.98	0
A3	BESS3	0.2	0.9	50	50	0.98/0.98	0
A4	BESS4	0.2	0.9	50	50	0.98/0.98	0

表 A4 冷热电联供系统微型燃气轮机参数
Table A4 Parameters of micro-turbines in CCHP system

区域能源互联网	微型燃气轮机	P_{MT}^{min}/kW	P_{MT}^{min}/kW	R_{up}/R_{down}	k_3	k_2	k_1	k_0
A1	MT1	0	250	75/75	0.075 3	0.309 5	0.417 4	0.168 0
A2	MT2	0	250	75/75	0.075 3	0.309 5	0.417 4	0.168 0

注: R_{up}, R_{down} 分别为 DG 向上、向下的爬坡率; $S_{SOC,max}, S_{SOC,min}$ 分别为蓄电池状态的上下限; P_{dis}^{max} 为放电功率上限; P_{ch}^{max} 为充电功率上限; η_{ch}, η_{dis} 分别为蓄电池的充放电能效系数; δ 为蓄电池的自放电系数。

Multi-source and multi-level coordination optimization method of energy internet

DAI Xianzhong¹, HAN Xinyang¹, DONG Yihua², LUO Haihua², LI Yu^{3,4}

(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Zhejiang Energy Technology Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 4. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China)

Abstract: Energy internet has become the key technology for intelligent management of distributed devices and complementary applications of multiple forms of coupling energy. In order to solve the problem of multi-energy coordination optimization in energy, this paper proposes a multi-source and multi-level for the energy internet with renewable energy according to the idea of "layered control-collaborative optimization". The distributed equipment is managed to realize coordinated and optimal scheduling of cold, heat, electricity and gas energy in the regional system. Finally, the genetic algorithm based on real number coding technology is used to simulate the optimization model. It is verified that the stratified optimization scheme can achieve regional energy Internet energy autonomy and multi-energy optimization with minimum cost as the optimization target, and solve the optimal scheduling between different regions problem.

Keywords: energy internet; renewable energy; distributed equipment; hierarchical optimization; genetic algorithm

(编辑 方晶)