

基于全局 Pareto 的台区柔性可调资源分布式协调优化建模^①



潘琪¹, 范磊¹, 陈康¹, 孟显海², 杨凤坤³

¹(国网江苏省电力有限公司 苏州供电分公司, 苏州 215000)

²(南京邮电大学, 南京 210023)

³(国电南瑞南京控制系统有限公司, 南京 211106)

通讯作者: 范磊, E-mail: 283918614@qq.com

摘要: 为了节约资源、减少终端用户电费支出、降低电力公司成本, 并满足用户多样的冷热电负荷需求, 提出一种台区下的资源调控及优化方法. 通过分析台区下资源分层分布式协调运行典型场景, 以局部 Agent 层和电源 Agent 层为优化双目标, 建立分层分布式协调优化模型, 以电能平衡、与主网交互功率和电压约束等为约束条件, 利用模型预测控制算法求解模型最优解. 最后通过在不同典型场景下算例验证所提方法的可行性, 为可调资源优化提供技术支持.

关键词: 资源调控; 多源自治; 多源协同; 分层分布式协调; 模型预测控制算法

引用格式: 潘琪, 范磊, 陈康, 孟显海, 杨凤坤. 基于全局 Pareto 的台区柔性可调资源分布式协调优化建模. 计算机系统应用, 2020, 29(12): 170-177. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7692.html>

Distributed Coordination Optimization Modeling of Flexible and Adjustable Resources in Platform Area Based on Global Pareto

PAN Qi¹, FAN Lei¹, CHEN Kang¹, MENG Xian-Hai², YANG Feng-Kun³

¹(Suzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Suzhou 215000, China)

²(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

³(Guodian NARI Nanjing Control System Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to save resources, reduce the electricity expense of the end user, reduce the cost of the power company, and satisfy the various cold and hot load demands of the users, a method of resource regulation and optimization under the platform area is proposed. By analyzing the typical scenario of layered distributed coordinated operation of resources under the platform area, a layered distributed coordinated optimization model was established with the dual objectives of the local agent layer and the power supply agent layer as the optimization objectives. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by examples in different typical scenarios to provide technical support for the optimization of adjustable resources.

Key words: resource regulation; multi-source autonomy; multi-source collaboration; hierarchical distributed coordination; model predictive control algorithm

随着现代化工业的不断发展, 随之而来的是对各种资源的巨大需求^[1]. 经济结构的发展也推动了能源消费

结构的改变, 以自动控制系统、先进的材料技术、灵活的制造工艺等新技术为基础的可调资源发电技术在负

① 收稿时间: 2020-04-25; 修改时间: 2020-05-21; 采用时间: 2020-05-26; csa 在线出版时间: 2020-11-30

荷调控及优化方面发挥着重要作用. 如何利用可调资源实现横向多源互补、纵向源-网-荷-储协调的台区下多源协调优化调度, 促进电网供需平衡, 减少终端用户电费支出、降低电力公司成本、节约资源、减少环境污染, 同时减少社会对电力建设的投入是今后研究重点.

文献 [2] 提出以提高风电消纳能力为目标, 考虑源荷多时间尺度的优化调度策略, 构建了源荷储协同调度模型, 并通过算例验证了所提策略的有效性; 文献 [3] 基于分布式算法提出了一种考虑风光火储和可控负荷的多区域调度优化模型, 并通过算例验证电储能装置和可控负荷的参与, 能够降低区域互联系统对发电机组的备用要求, 提高系统的备用能力; 文献 [4] 提出了以成本最优和设备输出功率调整量最小为混合目标, 建立了多时间尺度的优化调度模型, 该模型可以保证综合能源系统的经济性运行, 又能减轻电网平抑功率波动负担; 文献 [5] 提出了一种变频空调负荷虚拟同步机群参与微网调频的控制方法, 并验证了负荷虚拟同步机化改造能够有效提升空调负荷参与调频的能力; 文献 [6] 运用模糊综合评估法构建了多能互补综合能源优化利用评估体系, 并通过算例进行验证, 为多种能源的综合利用提供科学、准确的依据. 上述文献主要从源-网-荷等不同角度开展研究, 对台区下的资源调控与优化有借鉴意义, 但是基于模型预测控制的台区下

多源分层分布式协调优化研究相对较少. 本文通过分析台区下资源分层分布式协调运行典型场景, 对分布式电源、储能以及各种辅助设备建模, 以成本、效益、新能源消纳率、节能等多目标出发解析不同场景下供能设备的出力情况及储能设备的运行状态; 通过建立基于模型预测控制的分层分布式协调优化模型, 根据协调优化模型开发基于模型预测控制的多源协调优化模型的求解方法, 并通过算例验证该模型的有效性, 为可调资源利用奠定基础.

1 台区下资源分层分布式协调运行典型场景

与电网友好互动能够实现对可调资源的优化利用, 而且能够减少分布式能源对配电网的不利影响^[7-11].

1.1 场景 1. 多源自治运行控制模式

自治模式如图 1 所示. 按照效率最高、经济最优原则, 在安全约束条件下, 自治模式调控中心向各区域下发调控目标, 按照要求各区域进行可调资源的就地消纳, 把运行成本最低作为约束目标进行优化, 同时调控中心以数据平台为依靠, 监测区域负荷和能源状态, 以及网络安全约束校验. 在场景 1 条件下, 各个区域之间没有负荷以及能量的交互, 因此调控措施受到限制, 如下图的应用场景中, 区域 1、2、3 之间的调控之间相互没有干扰, 不存在能量与负荷的交互.

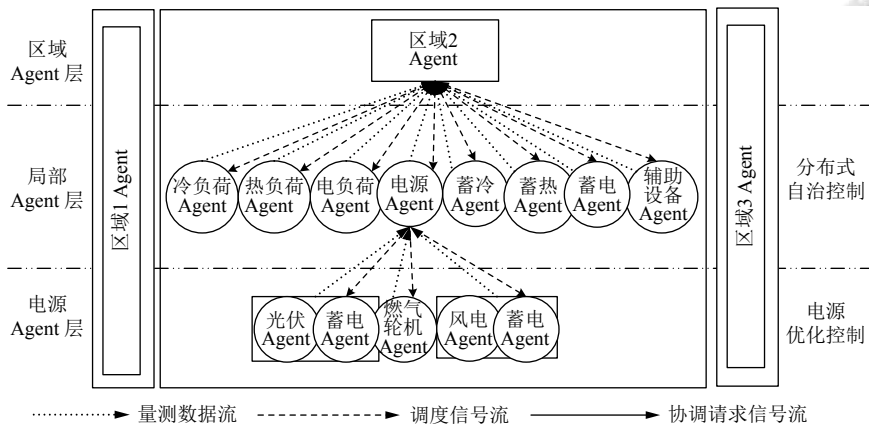


图 1 自治模式应用场景

在该模式下不能够完成区域内能量相互平衡下, 那么为了保持能量平衡, 就会进入场景 2, 调度区域之间的能量来实现总能量平衡.

1.2 场景 2. 多源协同优化调度模式

在网络安全约束为前提的条件下, 各区域在调度中心的统一安排下实现负荷或者能量的转移, 同时监

测和展示各个区域负荷和能源状态. 在该调度模式下, 能够执行的调控措施多种多样. 而且每个地区的能源补给与使用的预测、客户用能情况以及调控策略等信息能够实现全局共享、跨能量路由器的潮流调度. 如图 2 所示为多源协同优化调度模式下的场景, 区域 1, 2, 3 之间通过主动配电网实现电能的交互.

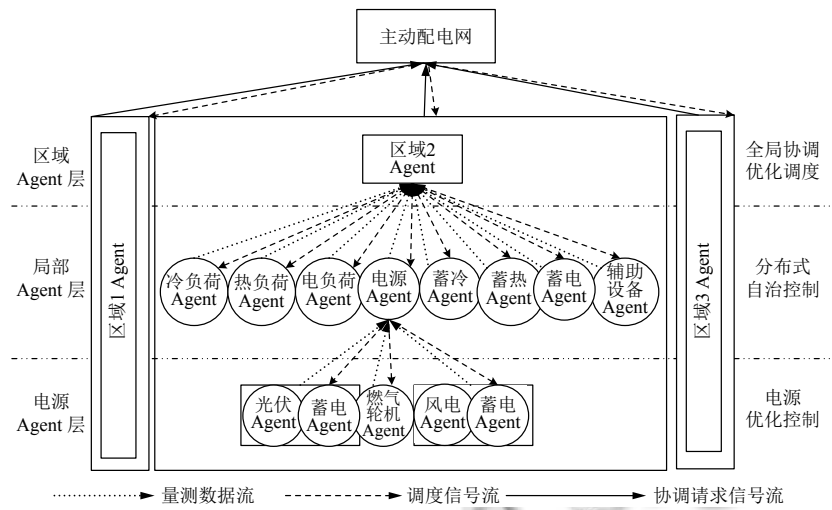


图2 多源协同优化模式应用场景

2 分层分布式协调运行优化建模

通过设立分层分布式优化调度机制,分别为区域Agent层、局部Agent层,Agent层以主动配电网为核心,综合各种分布式发电及蓄电设备、分布式冷热能产生和储存设备等,通过分层多源协调优化调度架构将整个优化模型的目标和约束分散到每一个Agent层,利用Agent层之间的相互联系及从属关系,通过主动配电网引导各个区域进行分布式优化调度,实现可调资源间的相互转换及能源的协调优化控制。

每个区域根据主动配电网下发的调度激励信号,区域内的各局部Agent:电源、冷热电负荷、冷热电储能设备及冷热电能源相互转换的辅助设备等,在满足主动配电网下发的调度目标后,以总体成本最低为优化目标函数,实现各个局部Agent的优化调度,实现区域内部的能量自治平衡。

2.1 目标函数

(1) 局部Agent层

1) 经济效益最优

本文所提出的可调资源优化配置的综合总成本由电网交互的功率成本、设备初始投资、燃料成本、系统运行维护成本组成。

$$\min f_1 = C_{\text{inf}} + C_{\text{fuel}} + C_{\text{om}} + C_{\text{grid}} \quad (1)$$

$$C_{\text{om}} =$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T [K_{\text{om,GT}} \cdot P_{\text{GT},j}(t) + K_{\text{om,GB}} \cdot Q_{\text{GB},j}(t) + K_{\text{om,TST}} \cdot |Q_{\text{TST},j}(t)| + K_{\text{om,AC}} \cdot Q_{\text{AC},j}(t) + K_{\text{om,EC}} \cdot Q_{\text{EC},j}(t) + K_{\text{om,BT}} \cdot |P_{\text{BT},j}(t)|] \cdot d_j \quad (5)$$

系统与电网交互费用为式(6)。

其中, C_{grid} 为微电网与电网交换的功率成本; C_{inf} 设备初始投资年等值成本; C_{om} 为系统设备运行成本; C_{fuel} 为系统燃料成本。

$$C_{\text{inf}} = R \cdot (P_{\text{cap,GT}} \cdot C_{\text{GT}} + P_{\text{cap,TST}} \cdot C_{\text{TST}} + P_{\text{cap,GB}} \cdot C_{\text{GB}} + Q_{\text{cap,AC}} \cdot C_{\text{AC}} + Q_{\text{cap,EC}} \cdot C_{\text{EC}} + P_{\text{cap,pv}} \cdot C_{\text{pv}} + P_{\text{cap,BT}} \cdot C_{\text{BT}}) \quad (2)$$

$$R = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (3)$$

其中, C_{TST} 为蓄热槽单位容量成本; C_{AC} 为吸收式制冷机的单位容量成本; C_{GB} 为燃气锅炉的单位容量成本; C_{GT} 为燃气轮机的投资单位容量成本; C_{EC} 为电制冷机单位容量成本; C_{BT} 为蓄电池单位容量成本; C_{PV} 为光伏电池单位容量成本; 下标 cap 表示设备额定容量; R 为资金年回收率; r 为折现率, 表现为加权平均资本成本, 是用来测算投资方案的净现值和净现值系数, 实现投资决策; n 为设备使用年限。

系统燃料费用包括燃气轮机燃料费用和燃气锅炉燃料费用:

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T [F_{\text{GT}}(P_{\text{GT},j}(t)) + F_{\text{GB}}(P_{\text{GB},j}(t))] \cdot d_j \quad (4)$$

系统运行维护费用包括主要设备维护费如式(5)。

$$C_{\text{grid}} = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T \left[(C_{\text{ph}} + \gamma C_{\text{se}}) / 2 \cdot P_{\text{ex},j}(t) + (C_{\text{ph}} - \gamma C_{\text{se}}) / 2 \cdot |P_{\text{ex},j}(t)| \right] \cdot d_j \quad (6)$$

其中, T 表示系统在典型日运行小时数; $K_{\text{om},i}$ 系统设备运行维护费用; d_j 表示典型日运行天数; M 表示第几个典型日; γ 值为 0 或 1, 当 $\gamma=1$ 时, 表示微电网通过售电给主网获得收益, 当 $\gamma=0$ 时, 表示微电网不向主网收取售电功率费用, $P_{\text{ex},j}(t)$ 小于 0 表示微电网向电网输出电

量, 大于 0 时表示微网从电网购电; C_{ph} 和 C_{se} 分别为微电网购售电费用。

2) 绿色节能最优

为了减低能源浪费, 提高单位能耗国内生产总值, 以一次能源消耗量最小为目标函数。

$$\min f_2 = \begin{cases} \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T \left[P_{\text{ex},j}(t) \cdot \mu_e + (F_{\text{GT},j}(t) + F_{\text{GB},j}(t)) \cdot \mu_f \right] \cdot d_j, & P_{\text{ex},j}(t) > 0 \\ \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T \left[(F_{\text{GT},j}(t) + F_{\text{GB},j}(t)) \cdot \mu_f \right] \cdot d_j, & P_{\text{ex},j}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ_f 为天然气一次能源转换系数; μ_e 为电网一次能源转换系数; P_{ex} 为系统向电网购买电量^[12]。

3) 新能源消纳率最大

新能源消纳率指的是光伏电池、风机等不可控分布式电源出力的实际利用效率, 它表示为参与系统优化调度的分布式电源出力与实际机组可调度的最大功率的比值, 用以下公式来表示:

$$\min f_3 = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{PV}}}{P_{t,\text{sche}}^{\text{WT}} + P_{t,\text{sche}}^{\text{PV}}} \right) \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{WT}} = \sum_{i=1}^M P_t^{\text{wt},\text{zon},i}, P_{t,\text{sche}}^{\text{WT}} = \sum_{i=1}^M P_{t,\text{sche}}^{\text{wt},\text{zon},i} \\ P_t^{\text{PV}} = \sum_{i=1}^M P_t^{\text{pv},\text{zon},i}, P_{t,\text{sche}}^{\text{PV}} = \sum_{i=1}^M P_{t,\text{sche}}^{\text{pv},\text{zon},i} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $P_t^{\text{wt},\text{zon},i}$ 、 $P_t^{\text{pv},\text{zon},i}$ 分别为局部能源层 i 在 t 时刻局部能源层风电和光伏参与调度的功率, $P_{t,\text{sche}}^{\text{wt},\text{zon},i}$ 、 $P_{t,\text{sche}}^{\text{pv},\text{zon},i}$ 分别为 t 时刻的局部能源层 i 内风电和光伏实际可参与调度最大功率。

(2) 电源 Agent 层:

电源 Agent 层优化目标为发电的经济成本最低。

$$\text{Min}(\rho_{\text{wind}} \times P_{\text{wind}} + \rho_{\text{GT}} \times P_{\text{GT}} + \rho_{\text{Sun}} \times P_{\text{Sun}} + \rho_{\text{ES}} \times P_{\text{ES}}), t \in N_t \quad (10)$$

$$P_{\text{joi}}(t) = P_{\text{Wind}}(t) + P_{\text{WES},\text{dis}}(t) - P_{\text{WES},\text{ch}}(t) + P_{\text{Sun}}(t) + P_{\text{SES},\text{dis}}(t) - P_{\text{SES},\text{ch}}(t) + P_{\text{GT}}(t) \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{RDG}}(t) \leq P_{\text{RDG}}^{\text{max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{ES},\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ES},\text{ch}}^{\text{max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{ES},\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ES},\text{ch}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{ES},\text{dis}}(t) \leq P_{\text{ES},\text{dis}}^{\text{max}} \\ P_{\text{ES},\text{ch}}(t) \cdot P_{\text{ES},\text{dis}}(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$E_{\text{ES}}(t+1) = E_{\text{ES}}(t) + P_{\text{ES},\text{ch}}(t) \eta_{\text{ES},\text{ch}} \Delta t - \frac{P_{\text{ES},\text{dis}}(t)}{\eta_{\text{ES},\text{dis}}} \Delta t \quad (13)$$

$$E_{\text{ES}}^{\text{min}} \leq E_{\text{ES}}(t) \leq E_{\text{ES}}^{\text{max}} \quad (14)$$

$$|E_{\text{ES}}(t) - E_{\text{ES}}(0)| \leq \varepsilon_{\text{ES}} \quad (15)$$

式中, N_T 表示调度时段集合 $[0, 1, \dots, T]$; Δt 表示每个时段的长度。对时段 t 而言, $P_{\text{joi}}(t)$ 表示新能源发电光伏发电和风力发电、各自的储能设备及微型燃气轮机的联合出力, 应该满足总体的发电调度需求; 约束条件中 $P_{\text{RDG}}(t)$ 和 $P_{\text{RDG}}^{\text{max}}(t)$ 分别表示新能源发电光伏发电和风力发电的调度发电功率和预测最大发电功率; $P_{\text{ES},\text{dis}}(t)$ 和 $P_{\text{ES},\text{ch}}(t)$ 分别表示 ES 装置的放电和充电功率; $E_{\text{ES}}(t)$ 表示 ES 装置的荷电状态。 $\eta_{\text{ES},\text{dis}}$ 和 $\eta_{\text{ES},\text{ch}}$ 分别表示 ES 装置的充电效率和放电效率; $P_{\text{ES},\text{dis}}^{\text{max}}$ 和 $P_{\text{ES},\text{ch}}^{\text{max}}$ 分别表示 ES 装置的最大充电和放电功率; ε_{ES} 表示调度周期结束时 ES 装置的荷电状态相对于开始时的允许变化范围。

2.2 约束条件

台区柔性可调资源往往包含了区域范围内冷能、热能、电能等多种形式能源的生产、传输、转换、消费过程, 因此设置电能平衡约束、冷平衡约束、热平衡约束。由于本文所提出的可调资源优化配置的综合总成本包含由电网交互的功率成本, 因此要设置与主网交互功率和电压约束条件。

(1) 电能平衡等式约束

电能平衡主要由燃气轮机、蓄电池、光伏发电、风力发电和电网满足电负荷和驱动地源热泵、户用空调, 蓄电池的有充放电两种模式, 因此电能平衡方程如下: 蓄电池放电公式如式 (16)。

$$P_{GT,j}(t) + P_{pv,j}(t) + P_{BT,j}^{disch}(t) \cdot \eta_{BT}^{disch} + P_{wind,j}(t) + P_{grid}(t) = P_{aircon,j}(t) + P_{pump,j}(t) + P_{e,j}(t) \quad (16)$$

蓄电池充电公式如式 (17).

$$P_{GT,j}(t) + P_{pv,j}(t) + P_{BT,j}^{ch}(t) / \eta_{BT}^{ch} + P_{wind,j}(t) + P_{grid}(t) = P_{aircon,j}(t) + P_{pump,j}(t) + P_{e,j}(t) \quad (17)$$

(2) 热能平衡不等式约束

热能平衡主要由燃气锅炉、地源热泵和电储热锅炉满足热负荷的需求, 电储热锅炉有充放热两种模式, 因此热能平衡方程如下:

电储热锅炉放热:

$$Q_{gasboil,j}(t) \cdot \eta_{rec} + Q_{disch,j}(t) \cdot \eta_{TST}^{disch} + Q_{pump,j}(t) \geq Q_{h,j}(t) \quad (18)$$

电储热锅炉蓄热:

$$Q_{gasboil,j}(t) \cdot \eta_{rec} + Q_{ch,j}(t) / \eta_{TST}^{ch} + Q_{pump,j}(t) \geq Q_{h,j}(t) \quad (19)$$

(3) 冷能平衡等式约束

冷能平衡主要由空调、地源热泵和冰蓄冷满足冷负荷的需求, 冰蓄冷有蓄放冷两种模式, 因此冷能平衡方程如下:

冰蓄冷放冷:

$$Q_{aircon,j}(t) \cdot \eta_{rec} + Q_{disch,j}(t) \cdot \eta_{TST}^{disch} + Q_{pump,j}(t) \geq Q_{h,j}(t) \quad (20)$$

冰蓄冷蓄冷:

$$Q_{aircon,j}(t) \cdot \eta_{rec} + Q_{ch,j}(t) / \eta_{TST}^{ch} + Q_{pump,j}(t) \geq Q_{h,j}(t) \quad (21)$$

(4) 与主网交互功率和电压约束

$$P_{ex}^{min} \leq P_{ex,j}(t) \leq P_{ex}^{max} \quad (22)$$

其中, P_{ex}^{min} 表示系统与主网最大交换功率的下限, P_{ex}^{max} 表示系统与主网最大交换功率的上限.

$$U_{min} \leq U(t) \leq U_{max} \quad (23)$$

$$x(k + \Delta t) = \begin{bmatrix} P_{MT}(k + \Delta t) \\ P_{FC}(k + \Delta t) \\ P_{bat}(k + \Delta t) \\ S_B(k + \Delta t) \\ P_{grid}(k + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{E_{bat}} & 1 - \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{MT}(k) \\ P_{FC}(k) \\ P_{bat}(k) \\ S_B(k) \\ P_{grid}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{\Delta t}{E_{bat}} \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{MT}(k) \\ \Delta P_{FC}(k) \\ \Delta P_{bat}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{load}(k) \\ \Delta P_{wind}(k) \\ \Delta P_{PV}(k) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} P_{grid}(k) \\ S_B(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot [P_{MT}(k) \ P_{FC}(k) \ P_{bat}(k) \ S_B(k) \ P_{grid}(k)]^T \quad (29)$$

由式 (27) 和式 (28) 可知, 通过该状态空间预测模型反复迭代, 并基于可再生能源和负荷超短期功率

式中, U_{max} 、 U_{min} 为 t 时刻的与外界大电网联络线电压的上下限制.

3 优化算法

针对本文分层分布式协调运行优化模型, 以模型预测控制作为优化算法, 可以更大限度地消除微电网中不确定性因素对优化运行调度方案的影响. 通过状态空间模型建立起预测控制, 推导基于状态空间模型的预测方程.

多源协调优化模型求解依据储能 SOC 和功率平衡方程, 把储能 SOC、储能充放电功率、区域互联网与外电网的联络线交换功率和可调度机组出力构成的向量作为状态向量:

$$x(k) = [P_{MT}(k), P_{FC}(k), P_{bat}(k), S_B(k), P_{grid}(k)]^T \quad (24)$$

以可调度机组和储能的出力增量构成向量为控制变量:

$$u(k) = [\Delta P_{MT}(k), \Delta P_{FC}(k), \Delta P_{grid}(k)]^T \quad (25)$$

以负荷、风电机组及光伏的超短期预测功率增量构成的向量为扰动输入:

$$r(k) = [\Delta P_{load}(k), \Delta P_{wind}(k), \Delta P_{PV}(k)]^T \quad (26)$$

以联络线交换功率和储能 SOC 构成的向量为输出变量:

$$y(k) = [P_{grid}(k), S_B(k)]^T \quad (27)$$

建立多输入、多输出状态空间模型如式 (28)、式 (29).

预测数据, 直到相前预测 p 步, 获得储能 SOC 和联络线在预测时长 $p\Delta t$ 内的预估输出值构成的向量 Y_t :

$$Y_t = [P_{grid}^f(k+\Delta t), S_B^f(k+\Delta t), \dots, P_{grid}^f(k+p\Delta t), S_B^f(k+p\Delta t)] \quad (30)$$

为应对可再生能源和负荷日前预测导致的联络线功率波动, 保证储能在日内调度中遵循日运行能量平衡的约束, 并且确保联络线功率跟踪日前计划值, 在当前时刻向前 $p\Delta t$ 时段进行取值, 储能 SOC 日前计划值以及联络线功率日前计划值构成的向量 R_{da} 为跟踪控制目标. 其中 R_{da} 可描述如下:

$$R_{da} = \begin{bmatrix} P_{grid}^{ref}(k+\Delta t), S_B^{ref}(k+\Delta t) \\ \dots \\ P_{grid}^{ref}(k+p\Delta t), S_B^{ref}(k+p\Delta t) \end{bmatrix}^T \quad (31)$$

然后以目标为它们之间的误差最小, 而且还要保证各机组控制调节增量尽可能的小, 于是能够把对应的滚动优化调度转化为二次规划问题.

目标函数:

$$\min J = (R_{da} - Y_f)^T W_{err}(R_{da} - Y_f) + U^T Q_u U \quad (32)$$

约束条件:

$$\begin{cases} \Delta P_{MT}^{min} \leq \Delta P_{MT}^t \leq \Delta P_{MT}^{max} \\ P_{MT}^{min} \leq P_{MT}^t \leq P_{MT}^{max} \\ \Delta P_{FC}^{min} \leq \Delta P_{FC}^t \leq \Delta P_{FC}^{max} \\ P_{FC}^{min} \leq P_{FC}^t \leq P_{FC}^{max} \\ \Delta P_{bat}^{min} \leq \Delta P_{bat}^t \leq \Delta P_{bat}^{max} \\ P_{bat}^{min} \leq P_{bat}^t \leq P_{bat}^{max} \\ S_B^{min} \leq S_B^t \leq S_B^{max} \end{cases} \quad (33)$$

其中, Q_u 为控制量的权重系数矩阵.

$W_{err} = \text{diag}[W_g^k, W_B^k, \dots, W_g^{k+p\Delta t}, W_B^{k+p\Delta t}]$ 为储能 SOC 跟踪误差和联络线功率跟踪误差的权重系数矩阵.

然后通过利用 Matlab 优化工具箱的 quadprog 函数求解模型.

4 算例分析

4.1 算例描述

为充分验证上述基于模型预测控制算法进行多源协调优化模型的求解, 本节选取综合能源片区的 3 个典型多能源互联系统进行案例分析, 各区域内均有居民用户, 商业用户和工业用户, 按照前述的光伏预测法, 得到光伏的出力曲线, 按照前述的聚类分析法, 得到用户负荷曲线.

各区域的设备配置如表 1 所示, 分布式电源设备有微型燃气轮机、光伏发电、风力发电, 制冷设备有空调、热泵, 制热设备有燃气锅炉和热泵, 蓄能设备有蓄电池、电储热锅炉和冰蓄冷. 分时电价如表 2 所示.

表 1 设备参数表

设备	参数名称	取值及单位
微型燃气轮机	最大发电功率	400 kW
	最大充电/放电功率	180 kW
蓄电池	充电/放电效率	0.99
	电池容量	400 kWh
	荷电状态范围	[0.3,0.9]
空调	最大输入功率	70 kW
	额定制冷效率	4
燃气锅炉	最大输出功率	200 kW
热泵	最大输入功率	600 kW
	额定制冷效率	5.3
	额定制热效率	4.3
电储热锅炉	最大蓄能/放能功率	100 kW
	蓄能/放能效率	0.95
	锅炉容量	400 kWh
冰蓄冷	蓄能/放能效率	0.95
	冰蓄冷容量	400 kWh
	荷能状态范围	[0.3,0.9]

表 2 分时电价表

时段	电价(元/kWh)
峰段	0.8118
平段	0.5713
谷段	0.3438

该地区采用分时电价计价方式, 平段时间为 7:00—8:00, 11:00—18:00; 谷段时间为 23:00—7:00, 峰段时间为 8:00—11:00, 18:00—23:00; 具体如表 2.

天然气价格为: 3.25 元/立方米, 换算为 0.33 元/kWh. 把各区域的负荷分为电、冷和热负荷. 通过聚类分析以及负荷预测, 获得每个区域的负荷值, 负荷值如图 3~图 5 所示.

根据历史数据预测得到的光伏出力和风电出力的最大值如图 6 所示.

4.2 算例结果分析

场景 1. 多源自治运行控制模式.

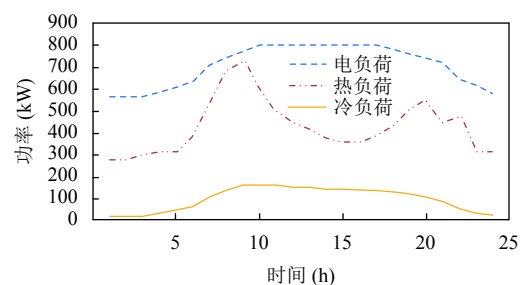


图 3 区域 1 的冷热电负荷图

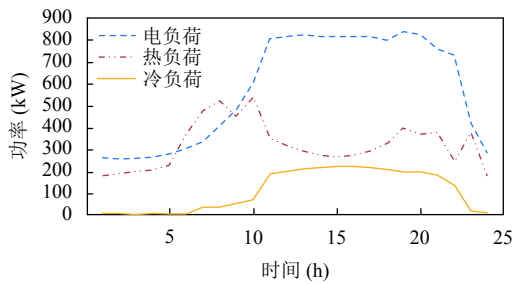


图4 区域2的冷热电负荷图

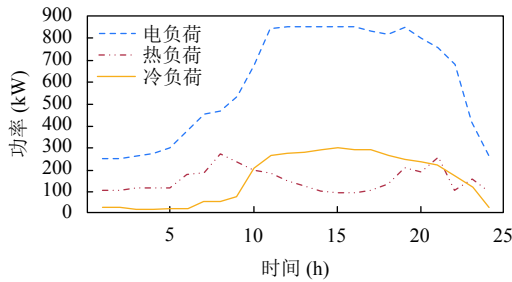


图5 区域3的冷热电负荷图

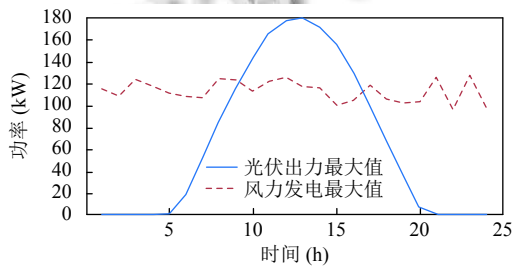


图6 光伏风电最大出力图

首先,为了验证基于多智能体的分层分布式协调优化调度的优点,采用未分层分布式优化调度方式对3个区域进行优化调度,调度结果如下.由于本文通过设置多层次多目标进行优化,因此采用 Pareto 图来寻找最优解.各区域的 Pareto 最优解如图7~图9所示.

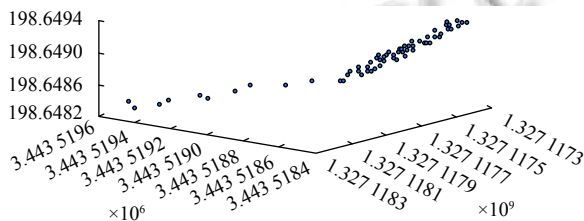


图7 区域1的 Pareto 图

各区域的最优解的值如表3所示.

然后,采用基于多智能体的分层分布式协调优化调度时,各区域的 Pareto 最优解如图10~图12所示.

各区域的最优解的值如表4所示.

综合对比最优解值,未采用基于多智能体的分层分布式协调优化调度时,总的经济成本为8301元,燃气耗

量为2589 898 J,新能源的消纳量为8218.6496 kWh,而采用基于多智能体的分层分布式协调优化调度时,总的经济成本为8061元,燃气耗量为2559 898 J,新能源消纳量为8255.6154 kWh.因此,多源自治运行控制模式有良好的优化效果.

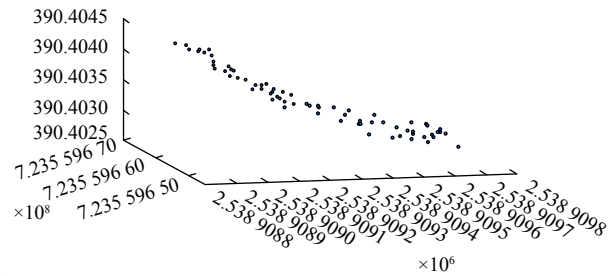


图8 区域2的 Pareto 图

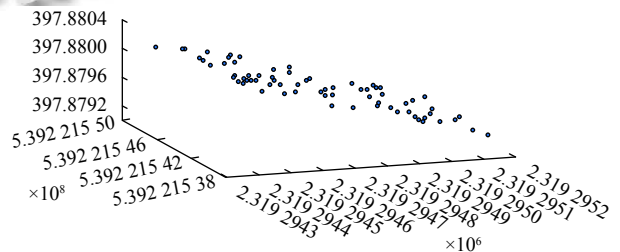


图9 区域3的 Pareto 图

表3 各区域的最优解的值

最优解	区域1	区域2	区域3	全局
成本(元)	3443	2538	2319	8301
燃气(J)	1327 117	723 559	539 221	2589 898
新能源消纳量(kWh)	2870.1083	2679.0035	2669.5378	8218.65

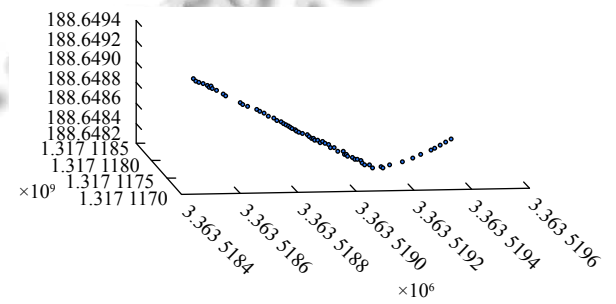


图10 区域1的 Pareto 图

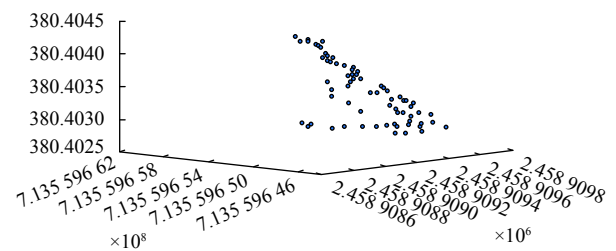


图11 区域2的 Pareto 图

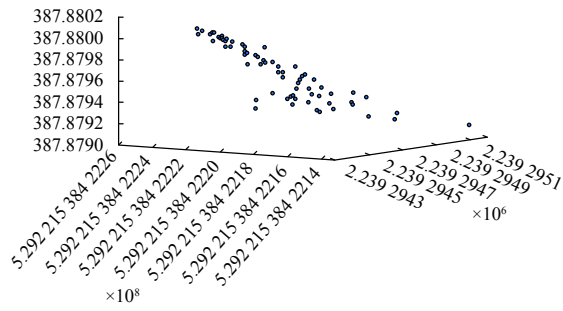


图 12 区域3的 Pareto 图

表 4 各区域的最优解的值

最优解	区域1	区域2	区域3	全局
成本(元)	3363	2458	2239	8061
燃气(J)	1317 117	713 559	529 221	2559 898
新能源消纳量(kWh)	2882.2	2690.5	2682.97	8255.6

场景 2. 多源协同运行控制模式.

全局 Pareto 最优解如图 13.

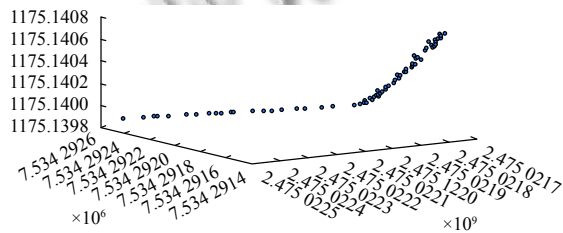


图 13 全局 Pareto 图

各目标的最优解的值及其与场景一对应值的对比如表 5.

表 5 各目标的最优解的值

最优解	场景1全局	场景二全局
成本(元)	8061	7534
燃气(J)	2559 898	2475 021
新能源消纳量(kWh)	8255.6154	8337.1667

在多源自治运行控制模式下, 总经济成本为 8061 元, 燃气耗量为 2559 898 J, 新能源消纳量为 8255.6154 kWh, 在多源协同运行控制模式下, 总的经济成本为 7534 元, 燃气耗量为 2475 021 J, 新能源消纳量为 8337.1667 kWh. 所以, 多源协同运行控制模式比多源自治运行控制模式更优.

因此, 无论是在场景 1 还是场景 2 下, 通过分层分布式协调优化调度时, 都有较好的优化效果. 基于全局考虑, 多源协同运行控制模式的优化模式明显能够减少运营成本, 并且提高新能源消纳, 为实现对可调资源的优化利用奠定了基础.

5 结论

本文从技术和经济因素层面优化了台区下资源调控及优化的设计模型, 采用分层分布式进行协调优化, 并以模型预测控制作为优化算法进行求解分析. 通过在场景 1: 多源自治运行控制模式下和场景 2: 多源协同运行控制模式下进行分析, 得出台区下资源调控及优化的最佳设计模式, 可以通过使用分布式能源发电来提高盈利能力, 同时需要与电网友好互动以提高优化效果. 本研究对制定多源协调优化调度策略、降低电力公司成本、节约资源、减少环境污染, 以及减少社会对电力建设的投入有着重要意义.

参考文献

- 张晓静. 浅谈供暖节能新技术及应用. 科技信息, 2012, (1): 124.
- 崔杨, 张家瑞, 仲悟之, 等. 考虑源-荷多时间尺度协调优化的大规模风电接入多源电力系统调度策略. 电网技术. (2020-02-24). [doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2577]
- 刘敦楠, 李鹏飞, 葛睿, 等. 考虑可调负荷和储能的区域互联备用优化模型. 电力建设, 2019, 40(12): 22-29.
- 何畅, 程杉, 徐建宇, 等. 基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调度. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 77-84, 97.
- 徐青山, 王栋, 戴蔚莺, 等. 变频空调负荷虚拟同步机改造及其参与微网互动调控. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 8-14.
- 孟显海, 吕红芝, 高辉, 等. 多能互补综合能源优化利用评估技术研究. 电器与能效管理技术, 2019, (8): 7-14.
- 张跃, 杨涛艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
- Gu AL, Zhou XY. Emission reduction effects of the green energy investment projects of China in Belt and Road Initiative countries. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 1747947. [doi: 10.1080/20964129.2020.1747947]
- Bui N, Castellani AP, Casari P, et al. The Internet of energy: A Web-enabled smart grid system. IEEE Network, 2012, 26(4): 39-45. [doi: 10.1109/MNET.2012.6246751]
- 黄鹤, 秦岭, 喻洋洋, 等. 水光多能互补清洁能源智能发电技术. 分布式能源, 2020, 5(2): 21-26.
- Lanzisera S, Weber AR, Liao AN, et al. Communicating power supplies: Bringing the Internet to the ubiquitous energy gateways of electronic devices. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(2): 153-160. [doi: 10.1109/JIOT.2014.2307077]
- 刘方泽, 牟龙华, 张涛, 等. 微能源网多能源耦合枢纽的模型搭建与优化. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 91-98.