



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112700094 B

(45) 授权公告日 2022.06.17

(21) 申请号 202011528062.1

G06F 30/20 (2020.01)

(22) 申请日 2020.12.22

H02J 3/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H02J 3/46 (2006.01)

申请公布号 CN 112700094 A

H02J 3/48 (2006.01)

(43) 申请公布日 2021.04.23

G06F 111/06 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

(73) 专利权人 上海电力大学

(56) 对比文件

地址 200090 上海市杨浦区平凉路2103号

CN 110807588 A, 2020.02.18

(72) 发明人 朱兰 田泽清 李孝均 崔楷舜

CN 109004686 A, 2018.12.14

(74) 专利代理机构 南京禹为知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 32272

CN 111738529 A, 2020.10.02

专利代理人 王晓东

CN 111738529 A, 2020.10.02

CN 110649594 A, 2020.01.03

CN 110148064 A, 2019.08.20

(51) Int. Cl.

审查员 刘彩凤

G06Q 10/06 (2012.01)

G06Q 10/04 (2012.01)

G06Q 50/06 (2012.01)

权利要求书4页 说明书11页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,包括,遵循日前调度结果中的DLC控制时段及容量需求,采用等效热参数模型对DLC控制时段的反弹负荷进行细节层次仿真,并优化选择空调机组的控制序列;利用多级Douglas-Peucker法压缩冗余负荷数据信息,修正反弹负荷曲线,建立计及细节层次DLC空调仿真日内调度模型;缩小时间尺度,进一步细化日内反弹负荷曲线,以日内优化调度结果为参考曲线,建立基于MPC的实时修正调度模型;利用LINGO软件结合MATLAB编程,对日前-日内-实时调度模型进行求解,得到多时间尺度下综合能源系统优化调度策略。本发明降低模型描述反弹负荷误差对系统调度计划的影响,贴合实际系统运行状态,体现多时间尺度调度的优越性。



1. 一种基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,其特征在于:包括,

获取综合能源系统的网架结构参数、能源类型及单位成本参数、用户各类型的功率需求和可再生能源预测出力信息;

基于日前预测的风电、光伏、负荷、电价信息数据,采用三阶段反弹负荷模型简化模拟空调参与直接负荷控制反弹特性;

根据所述综合能源系统的网架结构,建立考虑简化直接负荷控制的综合能源系统的电、热、气、冷功率平衡方程,同时建立计及三阶段反弹简化DLC日前调度模型;

遵循日前调度结果中的DLC控制时段及容量需求,采用等效热参数模型对所述DLC控制时段的反弹负荷进行细节层次仿真,并优化选择空调机组的控制序列;

对所述DLC控制时段的反弹负荷进行分钟级仿真,并优化选择空调机组的所述控制序列,采用所述等效热参数模型表示空调热交换过程,定义空调负荷的初始状态均匀分布,忽略空调的瞬间启动,电网电压波动和空调压缩机堵转的影响,遵循日前调度计划直接负荷控制的时段及削减容量,对空调群运行特性进行模拟仿真;

空调在较小温度区间内运行时,其室内温度变化轨迹用直线模拟,进而得到线性化的等效热参数模型,即状态队列模型,如下,

$$\begin{cases} T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{off}}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}), & k = 0 \\ T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{on}}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}), & k = 1 \end{cases}$$

其中, $T_i^t$ 、 $T_i^{t+1}$ 表示第*i*台空调在*t*、*t+1*时刻的室内温度;室内温度设定值区间为 $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ ,记空调运行时间为 $\tau_{\text{on}}$ ,停机时间为 $\tau_{\text{off}}$ ,*k*表示空调的运行状态,1表示空调启动,0表示空调停机; $\Delta t$ 为仿真时间步长;

利用多级Douglas-Peucker法压缩冗余负荷数据信息,修正反弹负荷曲线,建立计及细节层次DLC空调仿真日内调度模型;

缩小时间尺度,进一步细化日内反弹负荷曲线,以日内优化调度结果为参考曲线,建立基于MPC的实时修正调度模型;

实时修正所述调度模型以所述日内优化调度结果为参考曲线,基于模型预测控制理论,优化周期为15min,分辨率为5min,进一步细化日内反弹负荷曲线,校正各微源出力,为保证各微源尽量跟踪日内调度计划,保证整体优化结果的经济性,其目标函数为所有场景下优化周期内各微源出力相对日内调度计划参考值差值及实时调整增量的期望之和最小,如下,

$$\begin{aligned} \min C(t) &= \sum_{s=1}^{S_N} \rho_s \sum_{i=1}^M \left[ (\mathbf{W}_s(t+i) - \tilde{\mathbf{W}}(t+i)) \mathbf{Q}_w (\mathbf{W}_s(t+i) - \tilde{\mathbf{W}}(t+i))^T \right. \\ &\quad \left. + \Delta \mathbf{U}_s(t+i) \mathbf{H} \Delta \mathbf{U}_s^T(t+i) \right] \\ \tilde{\mathbf{W}}(t+i) &= [\tilde{P}_{\text{MT}}(t+i), \tilde{P}_{\text{sgrid}}(t+i), \tilde{P}_{\text{bgrid}}(t+i), \tilde{P}_{\text{store}}^x(t+i), \tilde{P}_{\text{release}}^x(t+i), \tilde{S}_{\text{ES}}^x(t+i)]^T \\ \mathbf{W}_s(t+i) &= [P_{\text{MT},s}(t+i), P_{\text{sgrid},s}(t+i), P_{\text{bgrid},s}(t+i), P_{\text{store},s}^x(t+i), P_{\text{release},s}^x(t+i), S_{\text{ES},s}^x(t+i)]^T \end{aligned}$$

其中,  $t$ 为当前优化时刻;  $Q_w$ 和 $H$ 为系数矩阵;  $W_s(t+i)$ 为预测时域内决策变量行向量, 包含微燃机出力、联络线交互功率及储能系统储能容量;  $\tilde{W}(t+i)$ 为日内调度求得的各微源有功出力及储能系统储能容量参考值;

利用LINGO软件结合MATLAB编程, 对日前-日内-实时调度模型进行求解, 得到多时间尺度下综合能源系统优化调度策略。

2. 根据权利要求1所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法, 其特征在于: 所述网架结构参数包括, 电网、可再生发电机组、微燃机、天然气网、燃气锅炉、电锅炉、电转气设备P2G、电制冷机、吸收式制冷机、余热锅炉和储能设备;

所述可再生发电机组包括, 风电机组和光伏电池;

所述储能设备包括, 储电设备、储气设备、储热设备和储冷设备。

3. 根据权利要求1或2所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法, 其特征在于: 采用所述三阶段反弹负荷模型来初步模拟空调负荷反弹特性, 包括,

$$\Delta L_{load}^{EDLC}(t) = -L_{load}^{Econtrol}(t) + L_{load}^{Erebound}(t)$$

$$L_{load}^{Erebound}(t) = \alpha L_{load}^{Econtrol}(t-1) + \beta L_{load}^{Econtrol}(t-2) + \gamma L_{load}^{Econtrol}(t-3)$$

其中,  $\Delta L_{load}^{EDLC}(t)$ 表示为 $t$ 时段受控后负荷需求变化量,  $L_{load}^{Erebound}(t)$ 表示第 $t$ 时段反弹负荷,  $L_{load}^{Econtrol}(t-1)$ 、 $L_{load}^{Econtrol}(t-2)$ 、 $L_{load}^{Econtrol}(t-3)$ 分别为 $t-1$ ,  $t-2$ ,  $t-3$ 时段的受控负荷,  $\alpha, \beta, \gamma$ 分别为其对应系数。

4. 根据权利要求3所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法, 其特征在于: 根据所述综合能源系统的架构信息, 列写综合能源系统的电、热、气、冷功率平衡方程, 包括,

$$P_{MT}^E(t) + P_{PV}^E(t) + P_{wind}^E(t) + P_{release}^E(t) - P_{store}^E(t) + P_{bgrid}(t) - P_{sgrid}(t) - P_{Eboil}^E(t) - P_{p2g}^E(t) - P_{EC}^E(t) = L_{load}^E(t) + \Delta L_{load}^{EDLC}(t)$$

$$P_{MT}^H(t) + P_{Gboil}^H(t) + P_{Eboil}^H(t) - P_{AC}^H(t) + P_{release}^H(t) - P_{store}^H(t) = L_{load}^H(t)$$

$$Q_{source}^{gas}(t) + Q_{p2g}^{gas}(t) - Q_{MT}^{gas}(t) - Q_{Gboil}^{gas}(t) + S_{ES}^g(t) - S_{ES}^g(t-1) = L_{load}^{gas}(t)$$

$$P_{EC}^{cold}(t) + P_{AC}^{cold}(t) + P_{release}^c(t) - P_{store}^c(t) = L_{load}^c(t)$$

其中,  $P_{PV}^E(t)$ 、 $P_{wind}^E(t)$ 和 $P_{MT}^E(t)$ 分别为 $t$ 时段光伏、风机和微燃机发电功率,  $P_{Eboil}^E(t)$ 、 $P_{p2g}^E(t)$ 、 $P_{EC}^E(t)$ 分别为电锅炉、电转气装置、电制冷机耗电功率;  $P_{MT}^H(t)$ 为经余热回收后的微燃机制热功率,  $P_{Gboil}^H(t)$ 、 $P_{Eboil}^H(t)$ 分别为燃气锅炉和电锅炉产热功率,  $P_{AC}^H(t)$ 为吸收式制冷机输入热功率;  $Q_{p2g}^{gas}(t)$ 为电转气设备产气量,  $Q_{MT}^{gas}(t)$ 、 $Q_{Gboil}^{gas}(t)$ 分别为微燃机、燃气锅炉消耗的天然气量,  $S_{ES}^g(t)$ 为 $t$ 时段储气容量;  $P_{EC}^{cold}(t)$ 、 $P_{AC}^{cold}(t)$ 分别为电制冷机、吸收式制冷机制冷功率,  $L_{load}^E(t)$ 、 $L_{load}^H(t)$ 、 $L_{load}^{gas}(t)$ 、 $L_{load}^c(t)$ 分别为 $t$ 时段电负荷需求、热负荷需求、气负荷需求、冷负荷需求。

5. 根据权利要求4所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,

其特征在于:还包括,

基于综合能源系统中各微源的功能数学模型,在满足系统各项基本约束条件下,考虑联络线交互成本,购气成本,各微源运行维护成本和直接负荷控制补偿成本为系统经济运行目标,计及三阶段反弹简化DLC日前调度模型包含的目标函数包括,

$$\begin{aligned} \min C_{d-a} &= \min (C_{\text{GRID}} + C_{\text{GAS}} + C_{\text{MC}} + C_{\text{DLC}}) \\ C_{\text{GRID}} &= \sum_{t=1}^T (C_{\text{bgrid}}(t)P_{\text{bgrid}}(t) - C_{\text{sgrid}}(t)P_{\text{sgrid}}(t))\Delta t \\ C_{\text{GAS}} &= \sum_{t=1}^T (C_{\text{gas}}Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t))\Delta t \\ C_{\text{MC}} &= \sum_{t=1}^T \left\{ C_{\text{MT}}^{\text{E}}P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{PV}}^{\text{E}}P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{wind}}^{\text{E}}P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{Eboil}}^{\text{E}}P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{Gboil}}^{\text{E}}P_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t) \right. \\ &\quad \left. + C_{\text{p2g}}^{\text{E}}P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{EC}}^{\text{E}}P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{AC}}^{\text{H}}P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t) + C_{\text{ES}}^{\text{x}}|P_{\text{release}}^{\text{x}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{x}}(t)| \right\} \Delta t \\ C_{\text{DLC}} &= \sum_{t=1}^T (C_{\text{CP}}(t)L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t))\Delta t \end{aligned}$$

其中,T为调度时段总数, $C_{\text{GRID}}$ 、 $C_{\text{GAS}}$ 、 $C_{\text{MC}}$ 、 $C_{\text{DLC}}$ 分别为RIES与主网交互成本,购买天然气成本,微源运行维护成本,直接负荷控制补偿成本, $P_{\text{sgrid}}(t)$ 和 $P_{\text{bgrid}}(t)$ 为t时段向主网售电和购电功率, $C_{\text{bgrid}}(t)$ 和 $C_{\text{sgrid}}(t)$ 分别为t时段向主网购电和售电电价; $Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t)$ 为t时段产气量, $C_{\text{gas}}$ 为单位天然气购买价格; $C_{\text{MT}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{PV}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{wind}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{Eboil}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{Gboil}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{p2g}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{EC}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{AC}}^{\text{H}}$ 分别为微燃机、光伏、风机、电锅炉、燃气锅炉、电转气装置、电制冷机、吸收式制冷机单位运行维护成本; $P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t)$ 为对应设备工作的输入功率;x代表能源类型,以e,h,c,g表示电热冷气四种能源, $C_{\text{ES}}^{\text{x}}$ 为各类储能设备单位运行维护成本, $P_{\text{store}}^{\text{x}}(t)$ 、 $P_{\text{release}}^{\text{x}}(t)$ 分别表示t时段各类储能设备充放功率; $C_{\text{CP}}(t)$ 为t时段受控负荷中断的单位补偿价格。

6. 根据权利要求1或4所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,其特征在于:包括,

建立有限时域微燃机、联络线、储能系统的有功出力预测模型,包括,

$$W_s(t+i|t) = W_0(t) + \sum_{j=1}^i \Delta U_s(t+j|t), \quad i=1,2,\dots,M$$

其中, $W_0(t)$ 为微燃机、联络线、储能系统有功初始值,由实际测量值校正得到, $\Delta U_s(t+j|t)$ 为t+j时刻控制有功增量, $W_s(t+i|t)$ 为t时刻预测t+i时刻有功出力值,M表示预测时域长度。

7. 根据权利要求6所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,其特征在于:超前的MPC控制无法保证可再生能源出力与预测值相同,从而导致下发的可控微源出力与实际有功出力之间存在一定偏差,增加反馈校正环约束,实现能量的闭环控制,包括,

$$W_0(t+1) = W_{\text{true}}(t+1) + \sigma(t+1)$$

其中,  $w_{\text{true}}(t+1)$  为  $t+1$  时刻各微源的实际运行功率;  $\sigma(t+1)$  为  $t+1$  时刻运行采样误差。

## 一种基于MPC及LODDLIC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及综合能源优化调度的技术领域,尤其涉及一种基于MPC(Model Predictive Control,模型预测控制)及LODDLIC(Level of detail direct load control,细节层次直接负荷控制)的综合能源系统多时间尺度优化调度方法。

### 背景技术

[0002] 已有的综合能源系统优化调度方法仅考虑了风、光等可再生能源出力的随机性对优化调度结果的影响,目前考虑直接负荷控制参与调度的研究多采用单一的简化直接负荷控制模型,针对直接负荷控制多时间尺度精细仿真的研究较少。传统阶段性反弹等简化模型难以准确表征其受控后的反弹负荷特性,不同时间尺度下采用不同细节层次的直接负荷控制仿真模型参与调度,有利于逐级修正反弹负荷曲线,降低简化直接负荷控制模型引起的反弹负荷误差对系统调度计划的影响,提高调度计划的可执行度。

### 发明内容

[0003] 本部分的目的在于概述本发明的实施例的一些方面以及简要介绍一些较佳实施例。在本部分以及本申请的说明书摘要和发明名称中可能会做些简化或省略以避免使本部分、说明书摘要和发明名称的目的模糊,而这种简化或省略不能用于限制本发明的范围。

[0004] 鉴于上述现有综合能源系统调度存在的问题,提出了本发明。

[0005] 因此,本发明提供了一种基于MPC及LODDLIC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,能够解决多时间尺度协调运行的问题。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供如下技术方案:包括,遵循日前调度结果中的DLC控制时段及容量需求,采用等效热参数模型对所述DLC控制时段的反弹负荷进行细节层次仿真,并优化选择空调机组的控制序列;利用多级Douglas-Peucker法压缩冗余负荷数据信息,修正反弹负荷曲线,建立计及细节层次DLC空调仿真日内调度模型;缩小时间尺度,进一步细化日内反弹负荷曲线,以日内优化调度结果为参考曲线,建立基于MPC的实时修正调度模型;利用LINGO软件结合MATLAB编程,对日前-日内-实时调度模型进行求解,得到多时间尺度下综合能源系统优化调度策略。

[0007] 作为本发明所述的基于MPC及LODDLIC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案,其中:进行所述细节层次仿真之前还包括,获取综合能源系统的网架结构参数、能源类型及单位成本参数、用户各类型的功率需求和可再生能源预测出力信息;基于日前预测的风电、光伏、负荷、电价信息数据,采用三阶段反弹负荷模型简化模拟空调参与直接负荷控制反弹特性;根据所述综合能源系统的网架结构,建立考虑简化直接负荷控制的综合能源系统的电、热、气、冷功率平衡方程,同时建立计及三阶段反弹简化DLC日前调度模型。

[0008] 作为本发明所述的基于MPC及LODDLIC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的

一种优选方案,其中:所述网架结构参数包括,电网、可再生发电机组、微燃机、天然气网、燃气锅炉、电锅炉、电转气设备P2G、电制冷机、吸收式制冷机、余热锅炉和储能设备;所述可再生发电机组包括,风电机组和光伏电池;所述的储能设备包括,储电设备、储气设备、储热设备和储冷设备。

[0009] 作为本发明所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案,其中:采用所述三阶段反弹负荷模型来初步模拟空调负荷反弹特性,包括,

$$[0010] \quad \Delta L_{\text{load}}^{\text{EDLC}}(t) = -L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t) + L_{\text{load}}^{\text{Erebound}}(t)$$

$$[0011] \quad L_{\text{load}}^{\text{Erebound}}(t) = \alpha L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-1) + \beta L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-2) + \gamma L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-3)$$

[0012] 其中, $\Delta L_{\text{load}}^{\text{EDLC}}(t)$ 表示为t时段受控后负荷需求变化量, $L_{\text{load}}^{\text{Erebound}}(t)$ 表示第t时段反弹负荷, $L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-1)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-2)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-3)$ 分别为t-1,t-2,t-3时段的受控负荷, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别为其对应系数。

[0013] 作为本发明所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案,其中:根据所述综合能源系统的架构信息,列写综合能源系统的电、热、气、冷功率平衡方程,包括,

$$[0014] \quad P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t) + P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t) + P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t) + P_{\text{release}}^{\text{c}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{c}}(t) + P_{\text{bgrid}}(t) - P_{\text{sgrid}}(t) - P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t) - P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t) - P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t) = L_{\text{load}}^{\text{E}}(t) + \Delta L_{\text{load}}^{\text{EDLC}}(t)$$

$$[0015] \quad P_{\text{MT}}^{\text{H}}(t) + P_{\text{Gboil}}^{\text{H}}(t) + P_{\text{Eboil}}^{\text{H}}(t) - P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t) + P_{\text{release}}^{\text{h}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{h}}(t) = L_{\text{load}}^{\text{H}}(t)$$

$$[0016] \quad Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t) + Q_{\text{p2g}}^{\text{gas}}(t) - Q_{\text{MT}}^{\text{gas}}(t) - Q_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t) + S_{\text{ES}}^{\text{g}}(t) - S_{\text{ES}}^{\text{g}}(t-1) = L_{\text{load}}^{\text{gas}}(t)$$

$$[0017] \quad P_{\text{EC}}^{\text{cold}}(t) + P_{\text{AC}}^{\text{cold}}(t) + P_{\text{release}}^{\text{c}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{c}}(t) = L_{\text{load}}^{\text{c}}(t)$$

[0018] 其中, $P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t)$ 和 $P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t)$ 分别为t时段光伏、风机和微燃机发电功率,

[0019]  $P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t)$ 分别为电锅炉、电转气装置、电制冷机耗电功率; $P_{\text{MT}}^{\text{H}}(t)$

为经余热回收后的微燃机制热功率, $P_{\text{Gboil}}^{\text{H}}(t)$ 、 $P_{\text{Eboil}}^{\text{H}}(t)$ 分别为燃气锅炉和电锅炉产热功率,

$P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t)$ 为吸收式制冷机输入热功率; $Q_{\text{p2g}}^{\text{gas}}(t)$ 为电转气设备产气量, $Q_{\text{MT}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $Q_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t)$ 分别为微燃机、燃气锅炉消耗的天然气量, $S_{\text{ES}}^{\text{g}}(t)$ 为t时段储气容量; $P_{\text{EC}}^{\text{cold}}(t)$ 、 $P_{\text{AC}}^{\text{cold}}(t)$ 分别为电制冷机、吸收式制冷机制冷功率, $L_{\text{load}}^{\text{E}}(t)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{H}}(t)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{c}}(t)$ 分别为t时段电负荷需求、热负荷需求、气负荷需求、冷负荷需求。

[0020] 作为本发明所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案,其中:还包括,基于综合能源系统中各微源的功能数学模型,在满足系统各项基本约束条件下,考虑联络线交互成本,购气成本,各微源运行维护成本和直接负荷控制补偿成本为系统经济运行目标,计及三阶段反弹简化DLC日前调度模型包含的目标函数包括,

[0021]  $\min C_{\text{d-a}} = \min(C_{\text{GRID}} + C_{\text{GAS}} + C_{\text{MC}} + C_{\text{DLC}})$

$$[0022] \quad C_{\text{GRID}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{bgrid}}(t)P_{\text{bgrid}}(t) - C_{\text{sgrid}}(t)P_{\text{sgrid}}(t))\Delta t$$

$$[0023] \quad C_{\text{GAS}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{gas}}Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t))\Delta t$$

$$[0024] \quad C_{\text{MC}} = \sum_{t=1}^T \left\{ C_{\text{MT}}^{\text{E}}P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{PV}}^{\text{E}}P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{wind}}^{\text{E}}P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{Eboil}}^{\text{E}}P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{Gboil}}^{\text{E}}P_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t) \right. \\ \left. + C_{\text{p2g}}^{\text{E}}P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{EC}}^{\text{E}}P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{AC}}^{\text{H}}P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t) + C_{\text{ES}}^{\text{x}}|P_{\text{release}}^{\text{x}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{x}}(t)| \right\} \Delta t$$

$$[0025] \quad C_{\text{DLC}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{CP}}(t)L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t))\Delta t$$

[0026] 其中,  $T$ 为调度时段总数,  $C_{\text{GRID}}$ 、 $C_{\text{GAS}}$ 、 $C_{\text{MC}}$ 、 $C_{\text{DLC}}$ 分别为RIES与主网交互成本, 购买天然气成本, 微源运行维护成本, 直接负荷控制补偿成本,  $P_{\text{sgrid}}(t)$ 和 $P_{\text{bgrid}}(t)$ 为 $t$ 时段向主网售电和购电功率,  $C_{\text{bgrid}}(t)$ 和 $C_{\text{sgrid}}(t)$ 分别为 $t$ 时段向主网购电和售电电价;  $Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t)$ 为 $t$ 时段产气量,  $C_{\text{gas}}$ 为单位天然气购买价格;  $C_{\text{MT}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{PV}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{wind}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{Eboil}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{Gboil}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{p2g}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{EC}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{AC}}^{\text{H}}$ 分别为微燃机、光伏、风机、电锅炉、燃气锅炉、电转气装置、电制冷机、吸收式制冷机单位运行维护成本;  $P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t)$ 为对应设备工作的输入功率;  $x$ 代表能源类型, 以 $e, h, c, g$ 表示电热冷气四种能源,  $C_{\text{ES}}^{\text{x}}$ 为各类储能设备单位运行维护成本,  $P_{\text{store}}^{\text{x}}(t)$ 、 $P_{\text{release}}^{\text{x}}(t)$ 分别表示 $t$ 时段各类储能设备充放功率;  $C_{\text{CP}}(t)$ 为 $t$ 时段受控负荷中断的单位补偿价格。

[0027] 作为本发明所述的基于MPC及LODDLDC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案, 其中: 包括, 对所述DLC控制时段的反弹负荷进行分钟级仿真, 并优化选择空调机组的所述控制序列, 采用所述等效热参数模型表示空调热交换过程, 定义空调负荷的初始状态均匀分布, 忽略空调的瞬间启动, 电网电压波动和空调压缩机堵转的影响, 遵循日前调度计划直接负荷控制的时段及削减容量, 对空调群运行特性进行模拟仿真; 空调在较小温度区间内运行时, 其室内温度变化轨迹可以近似用直线模拟, 进而得到线性化的等效热参数模型, 即状态队列模型, 如下,

$$[0028] \quad \begin{cases} T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{off}}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}), & k = 0 \\ T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{on}}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}), & k = 1 \end{cases}$$

[0029] 其中,  $T_i^t$ 、 $T_i^{t+1}$ 表示第 $i$ 台空调在 $t$ 、 $t+1$ 时刻的室内温度; 室内温度设定值区间为 $[T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ , 记空调运行时间为 $\tau_{\text{on}}$ , 停机时间为 $\tau_{\text{off}}$ ,  $k$ 表示空调的运行状态, 1表示空调启动, 0表示空调停机;  $\Delta t$ 为仿真时间步长。

[0030] 作为本发明所述的基于MPC及LODDLDC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案, 其中: 包括, 建立有限时域微燃机、联络线、储能系统的有功出力预测模型, 包括,

$$[0031] \quad W_s(t+i|t) = W_0(t) + \sum_{j=1}^i \Delta U_s(t+j|t), \quad i=1,2,\dots,M$$

[0032] 其中,  $W_0(t)$  为微燃机、联络线、储能系统有功初始值, 由实际测量值校正得到,  $\Delta U_s(t+j|t)$  为  $t+j$  时刻控制有功增量,  $W_s(t+i|t)$  为  $t$  时刻预测  $t+i$  时刻有功出力值,  $M$  表示预测时域长度。

[0033] 作为本发明所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案, 其中: 还包括, 实时修正所述调度模型以所述日内优化调度结果为参考曲线, 基于模型预测控制理论, 优化周期为15min, 分辨率为5min, 进一步细化日内反弹负荷曲线, 校正各微源出力, 为保证各微源尽量跟踪日内调度计划, 保证整体优化结果的经济性, 其目标函数为所有场景下优化周期内各微源出力相对日内调度计划参考值差值及实时调整增量的期望之和最小, 如下,

$$[0034] \quad \min C(t) = \sum_{s=1}^{S_N} \rho_s \sum_{i=1}^M \left[ (W_s(t+i) - \tilde{W}(t+i)) Q_w (W_s(t+i) - \tilde{W}(t+i))^T + \Delta U_s(t+i) H \Delta U_s^T(t+i) \right]$$

$$[0035] \quad \tilde{W}(t+i) = \left[ \tilde{P}_{MT}(t+i), \tilde{P}_{sgrid}(t+i), \tilde{P}_{bgrid}(t+i), \tilde{P}_{store}^x(t+i), \tilde{P}_{release}^x(t+i), \tilde{S}_{ES}^x(t+i) \right]^T$$

$$[0036] \quad W_s(t+i) = \left[ P_{MT,s}(t+i), P_{sgrid,s}(t+i), P_{bgrid,s}(t+i), P_{store,s}^x(t+i), P_{release,s}^x(t+i), S_{ES,s}^x(t+i) \right]^T$$

[0037] 其中,  $t$  为当前优化时刻;  $Q_w$  和  $H$  为系数矩阵;  $W_s(t+i)$  为预测时域内决策变量行向量, 包含微燃机出力、联络线交互功率及储能系统储能容量;  $\tilde{W}(t+i)$  为日内调度求得的各微源有功出力及储能系统储能容量参考值。

[0038] 作为本发明所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的一种优选方案, 其中: 超前的MPC控制无法保证可再生能源出力与预测值相同, 从而导致下发的可控微源出力与实际有功出力之间存在一定偏差, 增加反馈校正环约束, 实现能量的闭环控制, 包括,

$$[0039] \quad W_0(t+1) = W_{true}(t+1) + \sigma(t+1)$$

[0040] 其中,  $W_{true}(t+1)$  为  $t+1$  时刻各微源的实际运行功率;  $\sigma(t+1)$  为  $t+1$  时刻运行采样误差。

[0041] 本发明的有益效果: 本发明方法基于模型预测控制的计及细节层次直接负荷控制的多时间尺度协调优化调度策略, 日前-日内-实时三时间尺度调度相互协调配合, 随时间尺度的细化, 逐步减小预测误差, 不同时间尺度下采用不同细节层次直接负荷控制仿真模型参与调度, 逐级修正反弹负荷曲线, 与传统采用单一简化DLC模型相比, 降低模型描述反弹负荷误差对系统调度计划的影响, 进一步贴合实际系统运行状态, 体现多时间尺度调度方式的优越性。

## 附图说明

[0042] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案, 下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动性的前提下, 还可以根据这些附图获得其它

的附图。其中：

[0043] 图1为本发明第一个实施例所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的流程示意图；

[0044] 图2为本发明第一个实施例所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的综合能源系统结构示意图；

[0045] 图3为本发明第一个实施例所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的Douglas-Peucker数据抽稀示意图；

[0046] 图4为本发明第二个实施例所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的风机光伏出力及各类负荷日前预测示意图；

[0047] 图5为本发明第二个实施例所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的细节层次DLC与三阶段反弹DLC反弹负荷对比曲线示意图。

[0048] 图6为本发明第二个实施例所述的基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的日内调度联络线计划和实时调度基于模型预测控制滚动优化结果对比示意图。

## 具体实施方式

[0049] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合说明书附图对本发明的具体实施方式做详细的说明，显然所描述的实施例是本发明的一部分实施例，而不是全部实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都应当属于本发明的保护的范畴。

[0050] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明，但是本发明还可以采用其他不同于在此描述的其它方式来实施，本领域技术人员可以在不违背本发明内涵的情况下做类似推广，因此本发明不受下面公开的具体实施例的限制。

[0051] 其次，此处所称的“一个实施例”或“实施例”是指可包含于本发明至少一个实现方式中的特定特征、结构或特性。在本说明书中不同地方出现的“在一个实施例中”并非均指同一个实施例，也不是单独的或选择性的与其他实施例互相排斥的实施例。

[0052] 本发明结合示意图进行详细描述，在详述本发明实施例时，为便于说明，表示器件结构的剖面图会不依一般比例作局部放大，而且所述示意图只是示例，其在此不应限制本发明保护的范畴。此外，在实际制作中应包含长度、宽度及深度的三维空间尺寸。

[0053] 同时在本发明的描述中，需要说明的是，术语中的“上、下、内和外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。此外，术语“第一、第二或第三”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0054] 本发明中除非另有明确的规定和限定，术语“安装、相连、连接”应做广义理解，例如：可以是固定连接、可拆卸连接或一体式连接；同样可以是机械连接、电连接或直接连接，也可以通过中间媒介间接相连，也可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0055] 实施例1

[0056] 参照图1、图2和图3,为本发明的第一个实施例,提供了一种基于MPC及LODDLDC的综合能源系统多时间尺度优化调度方法,包括:

[0057] S1获取综合能源系统的网架结构参数、能源类型及单位成本参数、用户各类型的功率需求和可再生能源预测出力信息。参照图2,其中需要说明的是:

[0058] 网架结构参数包括,电网、可再生发电机组、微燃机、天然气网、燃气锅炉、电锅炉、电转气设备P2G、电制冷机、吸收式制冷机、余热锅炉和储能设备;

[0059] 可再生发电机组包括,风电机组和光伏电池;

[0060] 的储能设备包括,储电设备、储气设备、储热设备和储冷设备。

[0061] S2基于日前预测的风电、光伏、负荷、电价信息数据,采用三阶段反弹负荷模型简化模拟空调参与直接负荷控制反弹特性。本步骤需要说明的是:

$$[0062] \quad \Delta L_{\text{load}}^{\text{EDLC}}(t) = -L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t) + L_{\text{load}}^{\text{Erebound}}(t)$$

$$[0063] \quad L_{\text{load}}^{\text{Erebound}}(t) = \alpha L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-1) + \beta L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-2) + \gamma L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-3)$$

[0064] 其中,  $\Delta L_{\text{load}}^{\text{EDLC}}(t)$  表示为t时段受控后负荷需求变化量,  $L_{\text{load}}^{\text{Erebound}}(t)$  表示第t时段反弹负荷,  $L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-1)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-2)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t-3)$  分别为t-1, t-2, t-3时段的受控负荷,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  分别为其对应系数。

[0065] S3根据综合能源系统的网架结构,建立考虑简化直接负荷控制的综合能源系统的电、热、气、冷功率平衡方程,同时建立计及三阶段反弹简化DLC日前调度模型。其中需要说明的是:

[0066] 根据综合能源系统的架构信息,列写综合能源系统的电、热、气、冷功率平衡方程,包括,

$$[0067] \quad P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t) + P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t) + P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t) + P_{\text{release}}^{\text{c}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{c}}(t) + P_{\text{bgrid}}(t) - P_{\text{sgrid}}(t) - P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t) - P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t) - P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t) = L_{\text{load}}^{\text{E}}(t) + \Delta L_{\text{load}}^{\text{EDLC}}(t)$$

$$[0068] \quad P_{\text{MT}}^{\text{H}}(t) + P_{\text{Gboil}}^{\text{H}}(t) + P_{\text{Eboil}}^{\text{H}}(t) - P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t) + P_{\text{release}}^{\text{h}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{h}}(t) = L_{\text{load}}^{\text{H}}(t)$$

$$[0069] \quad Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t) + Q_{\text{p2g}}^{\text{gas}}(t) - Q_{\text{MT}}^{\text{gas}}(t) - Q_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t) + S_{\text{ES}}^{\text{g}}(t) - S_{\text{ES}}^{\text{g}}(t-1) = L_{\text{load}}^{\text{gas}}(t)$$

$$[0070] \quad P_{\text{EC}}^{\text{cold}}(t) + P_{\text{AC}}^{\text{cold}}(t) + P_{\text{release}}^{\text{c}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{c}}(t) = L_{\text{load}}^{\text{c}}(t)$$

[0071] 其中,  $P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t)$ 和 $P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t)$ 分别为t时段光伏、风机和微燃机发电功率,

$P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t)$ 分别为电锅炉、电转气装置、电制冷机耗电功率; $P_{\text{MT}}^{\text{H}}(t)$ 为经余热回收后的微燃机制热功率, $P_{\text{Gboil}}^{\text{H}}(t)$ 、 $P_{\text{Eboil}}^{\text{H}}(t)$ 分别为燃气锅炉和电锅炉产热功率, $P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t)$ 为吸收式制冷机输入热功率; $Q_{\text{p2g}}^{\text{gas}}(t)$ 为电转气设备产气量, $Q_{\text{MT}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $Q_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t)$ 分别为微燃机、燃气锅炉消耗的天然气量, $S_{\text{ES}}^{\text{g}}(t)$ 为t时段储气容量; $P_{\text{EC}}^{\text{cold}}(t)$ 、 $P_{\text{AC}}^{\text{cold}}(t)$ 分别为电制冷机、吸收式制冷机制冷功率, $L_{\text{load}}^{\text{E}}(t)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{H}}(t)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $L_{\text{load}}^{\text{c}}(t)$ 分别为t时段电负荷需求、热负荷需求、气负荷需求、冷负荷需求;

[0072] 基于综合能源系统中各微源的功能数学模型,在满足系统各项基本约束条件下,考虑联络线交互成本,购气成本,各微源运行维护成本和直接负荷控制补偿成本为系统经济运行目标,计及三阶段反弹简化DLC日前调度模型包含的目标函数包括,

$$[0073] \quad \min C_{d-a} = \min (C_{\text{GRID}} + C_{\text{GAS}} + C_{\text{MC}} + C_{\text{DLC}})$$

$$[0074] \quad C_{\text{GRID}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{bgrid}}(t)P_{\text{bgrid}}(t) - C_{\text{sgrid}}(t)P_{\text{sgrid}}(t))\Delta t$$

$$[0075] \quad C_{\text{GAS}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{gas}} Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t))\Delta t$$

$$[0076] \quad C_{\text{MC}} = \sum_{t=1}^T \left\{ C_{\text{MT}}^{\text{E}} P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{PV}}^{\text{E}} P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{wind}}^{\text{E}} P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{Eboil}} P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{Gboil}} P_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t) \right. \\ \left. + C_{\text{p2g}} P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{EC}} P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t) + C_{\text{AC}} P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t) + C_{\text{ES}}^{\text{x}} |P_{\text{release}}^{\text{x}}(t) - P_{\text{store}}^{\text{x}}(t)| \right\} \Delta t$$

$$[0077] \quad C_{\text{DLC}} = \sum_{t=1}^T (C_{\text{CP}}(t) L_{\text{load}}^{\text{Econtrol}}(t))\Delta t$$

[0078] 其中,T为调度时段总数, $C_{\text{GRID}}$ 、 $C_{\text{GAS}}$ 、 $C_{\text{MC}}$ 、 $C_{\text{DLC}}$ 分别为RIES与主网交互成本,购买天然气成本,微源运行维护成本,直接负荷控制补偿成本, $P_{\text{sgrid}}(t)$ 和 $P_{\text{bgrid}}(t)$ 为t时段向主网售电和购电功率, $C_{\text{bgrid}}(t)$ 和 $C_{\text{sgrid}}(t)$ 分别为t时段向主网购电和售电电价; $Q_{\text{source}}^{\text{gas}}(t)$ 为t时段产气量, $C_{\text{gas}}$ 为单位天然气购买价格; $C_{\text{MT}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{PV}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{wind}}^{\text{E}}$ 、 $C_{\text{Eboil}}$ 、 $C_{\text{Gboil}}$ 、 $C_{\text{p2g}}$ 、 $C_{\text{EC}}$ 、 $C_{\text{AC}}$ 分别为微燃机、光伏、风机、电锅炉、燃气锅炉、电转气装置、电制冷机、吸收式制冷机单位运行维护成本; $P_{\text{MT}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{wind}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{Eboil}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{Gboil}}^{\text{gas}}(t)$ 、 $P_{\text{p2g}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{EC}}^{\text{E}}(t)$ 、 $P_{\text{AC}}^{\text{H}}(t)$ 为对应设备工作的输入功率;x代表能源类型,以e,h,c,g表示电热冷气四种能源, $C_{\text{ES}}^{\text{x}}$ 为各类储能设备单位运行维护成本, $P_{\text{store}}^{\text{x}}(t)$ 、 $P_{\text{release}}^{\text{x}}(t)$ 分别表示t时段各类储能设备充放功率; $C_{\text{CP}}(t)$ 为t时段受控负荷中断的单位补偿价格。

[0079] S4遵循日前调度结果中的DLC控制时段及容量需求,采用等效热参数模型对DLC控制时段的反弹负荷进行细节层次仿真,并优化选择空调机组的控制序列。本步骤需要说明的是:

[0080] 对DLC控制时段的反弹负荷进行分钟级仿真,并优化选择空调机组的控制序列,采用等效热参数模型表示空调热交换过程,定义空调负荷的初始状态均匀分布,忽略空调的瞬间启动,电网电压波动和空调压缩机堵转的影响,遵循日前调度计划直接负荷控制的时段及削减容量,对空调群运行特性进行模拟仿真;

[0081] 空调在较小温度区间内运行时,其室内温度变化轨迹可以近似用直线模拟,进而得到线性化的等效热参数模型,即状态队列模型,如下,

$$[0082] \quad \begin{cases} T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{off}}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}), & k = 0 \\ T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{on}}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}), & k = 1 \end{cases}$$

[0083] 其中,  $T_i^t$ 、 $T_i^{t+1}$ 表示第*i*台空调在*t*、*t*+1时刻的室内温度;室内温度设定值区间为  $[T_{\min}, T_{\max}]$ ,记空调运行时间为 $\tau_{\text{on}}$ ,停机时间为 $\tau_{\text{off}}$ ,*k*表示空调的运行状态,1表示空调启动,0表示空调停机; $\Delta t$ 为仿真时间步长。

[0084] S5利用多级Douglas-Peucker法压缩冗余负荷数据信息,修正反弹负荷曲线,建立计及细节层次DLC空调仿真日内调度模型。参照图3,本步骤还需要说明的是:

[0085] 基于多级Douglas-Peucker算法数据压缩冗余负荷数据信息,修正反弹负荷曲线:

[0086] 常规Douglas-Peucker法的基本思路如图3所示,用直线连接曲线的首末两端,找出曲线中所有点到该直线的最大距离值 $d_{\max}$ ,比较 $d_{\max}$ 与精度限差*D*的大小:

[0087] (1) 如果 $d_{\max} < D$ ,则保留曲线首末端点;

[0088] (2) 如果 $d_{\max} \geq D$ ,则保留 $d_{\max}$ 对应的点,并以该点为界限,将原曲线分为左右两部分,对左右两部分分别重复上述过程;

[0089] 改进的多级Douglas-Peucker数据抽稀法分为整体抽稀与局部抽稀,将时序仿真结果适度压缩,以便进一步修正负荷曲线返回至RIES日内滚动调度模型中,修正调度结果;

[0090] 第一级数据抽稀:选取精度限差*D*对目标曲线整体抽稀,以保证整体曲线不失真;

[0091] 第二级数据抽稀:选取第*j*时段精度限差 $D_j$ 对各时段曲线局部抽稀,以达到局部平整化效果。

[0092] 计及细节层次DLC空调仿真日内调度每4小时预测日内风、光及各类负荷数据,优化周期为4小时,分辨率为15min,其模型包含的目标函数参见步骤2中日前调度模型,除了满足日前调度中各微源及储能系统的约束外,日内调度各状态变量应满足日前调度结果。

$$[0093] \begin{cases} u_{\text{store}}^x(t) / u_{\text{release}}^x(t) = u_{\text{store}}^{x,\text{da}}(t) / u_{\text{release}}^{x,\text{da}}(t) \\ u_{\text{sgrid}}^{\text{da}}(t) / u_{\text{bgrid}}^{\text{da}}(t) = u_{\text{sgrid}}^{\text{da}}(t) / u_{\text{bgrid}}^{\text{da}}(t) \end{cases}$$

[0094] 其中,  $u_{\text{store}}^{x,\text{da}}(t) / u_{\text{release}}^{x,\text{da}}(t)$ 为日前调度中各储能装置的充放状态结果,

$u_{\text{sgrid}}^{\text{da}}(t) / u_{\text{bgrid}}^{\text{da}}(t)$ 为日前调度中联络线各时段的购电售电状态。

[0095] S6缩小时间尺度,进一步细化日内反弹负荷曲线,以日内优化调度结果为参考曲线,建立基于MPC的实时修正调度模型。其中还需要说明的是:

[0096] 建立有限时域微燃机、联络线、储能系统的有功出力预测模型,包括,

$$[0097] W_s(t+i|t) = W_0(t) + \sum_{j=1}^i \Delta U_s(t+j|t), \quad i=1,2,\dots,M$$

[0098] 其中,  $W_0(t)$ 为微燃机、联络线、储能系统有功初始值,由实际测量值校正得到,  $\Delta U_s(t+j|t)$ 为*t*+*j*时刻控制有功增量,  $W_s(t+i|t)$ 为*t*时刻预测*t*+*i*时刻有功出力值, *M*表示预测时域长度;

[0099] 实时修正调度模型以日内优化调度结果为参考曲线,基于模型预测控制理论,优化周期为15min,分辨率为5min,进一步细化日内反弹负荷曲线,校正各微源出力,为保证各微源尽量跟踪日内调度计划,保证整体优化结果的经济性,其目标函数为所有场景下优化周期内各微源出力相对日内调度计划参考值差值及实时调整增量的期望之和最小,如下,

$$[0100] \quad \min C(t) = \sum_{s=1}^{S_N} \rho_s \sum_{i=1}^M \left[ (\mathbf{W}_s(t+i) - \tilde{\mathbf{W}}(t+i)) \mathbf{Q}_w (\mathbf{W}_s(t+i) - \tilde{\mathbf{W}}(t+i))^T + \Delta \mathbf{U}_s(t+i) \mathbf{H} \Delta \mathbf{U}_s^T(t+i) \right]$$

$$[0101] \quad \tilde{\mathbf{W}}(t+i) = [\tilde{P}_{MT}(t+i), \tilde{P}_{sgrid}(t+i), \tilde{P}_{bgrid}(t+i), \tilde{P}_{store}^x(t+i), \tilde{P}_{release}^x(t+i), \tilde{S}_{ES}^x(t+i)]^T$$

$$[0102] \quad \mathbf{W}_s(t+i) = [P_{MT,s}(t+i), P_{sgrid,s}(t+i), P_{bgrid,s}(t+i), P_{store,s}^x(t+i), P_{release,s}^x(t+i), S_{ES,s}^x(t+i)]^T$$

[0103] 其中,  $t$  为当前优化时刻;  $\mathbf{Q}_w$  和  $\mathbf{H}$  为系数矩阵;  $\mathbf{W}_s(t+i)$  为预测时域内决策变量行向量, 包含微燃机出力、联络线交互功率及储能系统储能容量;  $\tilde{\mathbf{W}}(t+i)$  为日内调度求得的各微源有功出力及储能系统储能容量参考值;

[0104] 超前的MPC控制无法保证可再生能源出力与预测值相同, 从而导致下发的可控微源出力与实际有功出力之间存在一定偏差, 增加反馈校正环节约束, 实现能量的闭环控制, 包括,

$$[0105] \quad W_0(t+1) = W_{true}(t+1) + \sigma(t+1)$$

[0106] 其中,  $W_{true}(t+1)$  为  $t+1$  时刻各微源的实际运行功率;  $\sigma(t+1)$  为  $t+1$  时刻运行采样误差。

[0107] S7利用LINGO软件结合MATLAB编程, 对日前-日内-实时调度模型进行求解, 得到多时间尺度下综合能源系统优化调度策略。

[0108] 不难理解的是, 直接负荷控制 (direct load control, DLC) 是一种激励型需求响应, 一般针对居民用户或小型商业用户中具有热储存能力的温控负荷 (thermostatically controlled loads, TCL) 实施, 如空调、电热水器, 受控负荷在中断时段从系统中断开, 在中断时段结束后重新与系统连接, 形成反弹负荷。

[0109] 而本发明涉及考虑风光出力和负荷的不确定性及其温控负荷反弹特性的精细建模程度对区域综合能源系统优化调度的影响, 日前调度采用三阶段反弹简化直接负荷控制模型, 以系统运行经济性最优为目标求解机组运行计划, 日内调度基于细节层次直接负荷控制仿真修正日前反弹负荷曲线, 求解各微源的出力计划, 实时调度进一步细化日内仿真反弹负荷曲线, 结合模型预测控制理论, 通过反馈校正和滚动优化调整微源出力, 实现多时间尺度的协调运行。

[0110] 实施例2

[0111] 参照图4和图5, 为本发明的第二个实施例, 该实施例不同于第一个实施例的是, 提供了一种基于MPC及LODDL的综合能源系统多时间尺度优化调度方法的验证, 包括:

[0112] 参照图2, 以区域综合能源系统为例, 系统各机组参数如表1所示, 可再生能源出力和各类负荷的日前预测数据参照图4, 日内预测数据以及实时数据根据日前预测数据及各自的概率分布生成, 设定光伏、风机和各类负荷需求均遵循正态分布, 日前三阶段反弹负荷模型的经验反弹系数  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为0.6, 0.2, 0.1, 空调负荷基本参数如表2所示, 设置区域内受控空调共100台, 分为4组, 1、2组空调设定温度区间  $[25^\circ\text{C}, 27^\circ\text{C}]$ , 3、4组空调设定温度区间  $[23^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]$ , 设置各台空调负荷的初始状态为均匀分布, 受控负荷接受控制的时段为14:00-17:00, 定义其对应时段外界环境温度为定值  $32^\circ\text{C}$ 。

[0113] 表1: 区域综合能源系统微源运行参数表。

类型	最小出力 /kW	最大出力 /kW	下爬坡率 /(kW/h)	上爬坡率 /(kW/h)	单位维护 成本/(元 /kW)
MT	15	115	5	15	0.025
EB	0	80	12	12	0.016
GFB	0	80	11	11	0.012
P2G	0	80	-	-	0.021
PV	0	60	-	-	0.0235
WT	0	200	-	-	0.0196
电制冷机	0	100	-	-	0.016
吸收式 制冷机	0	100	-	-	0.012
电网	-200	200	-	-	-
气网	0	300	-	-	-

[0114] 表2:空调负荷的运行参数表。

含义	参数	数值
室外温度	$T_0$	32℃
空调的能效比	$\eta$	2.7
单台空调功率	P	2.5kW
等效热阻	R	0.18kWh/℃
等效热容	C	5.56℃/kW
仿真时间间隔	$\Delta t$	1min
空调台数	N	100
1、2组温度限值	[ $T_{min1}, T_{max1}$ ]	[25℃, 27℃]
3、4组温度限值	[ $T_{min2}, T_{max2}$ ]	[23℃, 25℃]

[0117] 在日前调度中,采用了三阶段经验系数反弹模型来简化模拟温控负荷的反弹特性,求解出受控时段及削减容量,参照图5,59-62时段为净负荷高峰阶段,风电光伏出力减少且电网电价处于峰时段,系统功率缺额严重,DLC参与系统调度降低系统峰荷,减少功率缺额,在60-65时段出现反弹负荷,反弹负荷波动较小。

[0118] 在日内调度中,遵循日前调度结果下发的DLC削减时段及容量需求,对空调群负荷进行等效热参数建模仿真,从图5中可以看出,计及细节DLC空调仿真的反弹负荷与简化三阶段反弹负荷有明显差异,反弹负荷反复波动剧烈,造成负荷的二次高峰,究其原因是削减负荷时控制部分空调停机,导致空调机组的温度变化进而影响整个空调群原有的状态队列正常运行造成的,单独采用简化模型描述反弹负荷造成的误差降低调度计划的执行度,增加系统应对突然负荷变化的压力,通过计及细节层次DLC仿真,逐步修正反弹负荷数据,更

能贴合实际系统运行状态,提高调度计划的准确性。

[0119] 实时修正调度模型进一步细化日内反弹负荷曲线,以日内优化调度结果为参考曲线,基于模型预测控制理论,校正各微源出力。日内调度联络线计划和实时调度基于模型预测控制滚动优化的结果对比如图6所示:

[0120] 从图6中可以看出,基于MPC的滚动优化平缓了日内调度计划曲线。在实时调整阶段,随时间尺度缩小,进一步细化了日内反弹负荷曲线。在日内调度计划的指导下,计及源荷的预测误差实时滚动调整,利用反馈校正构成闭环优化,在保证整体经济的同时,减小了联络线交互功率的波动性。通过对比有无MPC滚动优化联络线功率的波动情况,可以看出基于模型预测控制的滚动优化既有效降低了预测误差对实际系统经济运行的影响。

[0121] 表3:基于不同DLC模型下调度结果表。

	日内调度 成本(元)	负荷 波动率	负荷峰谷差 (kW)	反弹负荷 峰值(kW)
[0122] 三阶段简化 DLC 模型	1819.06	25.83%	81.28	157.5
细节层次 DLC 模型	1858.45	47.81%	151.27	295

[0123] 表3中对比了采用简化DLC反弹模型和考虑细节层次DLC模型的日内调度结果及不同模型下计及反弹负荷的负荷曲线特征指标,从结果中可以看出,考虑细节层次DLC模型后增加了调度成本,但更贴合实际运行结果,对比分析关键时段的负荷波动率、负荷峰谷差、反弹负荷峰值等指标,实际中空调群的反弹负荷呈现反复波动特性,反弹负荷波动性更强,峰谷差更大,计及细节层次直接负荷控制模型可较为准确地表征反弹负荷特性,有利于系统制定出更符合实际运行的调度计划,增强应对实际负荷的能力,提高调度计划的可行性。

[0124] 本发明方法基于模型预测控制的计及细节层次直接负荷控制的多时间尺度协调优化调度策略,日前-日内-实时三时间尺度调度相互协调配合,随时间尺度的细化,逐步减小预测误差,不同时间尺度下采用不同细节层次直接负荷控制仿真模型参与调度,逐级修正反弹负荷曲线,与传统采用单一简化DLC模型相比,降低模型描述反弹负荷误差对系统调度计划的影响,进一步贴合实际系统运行状态,体现多时间尺度调度方式的优越性。

[0125] 应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

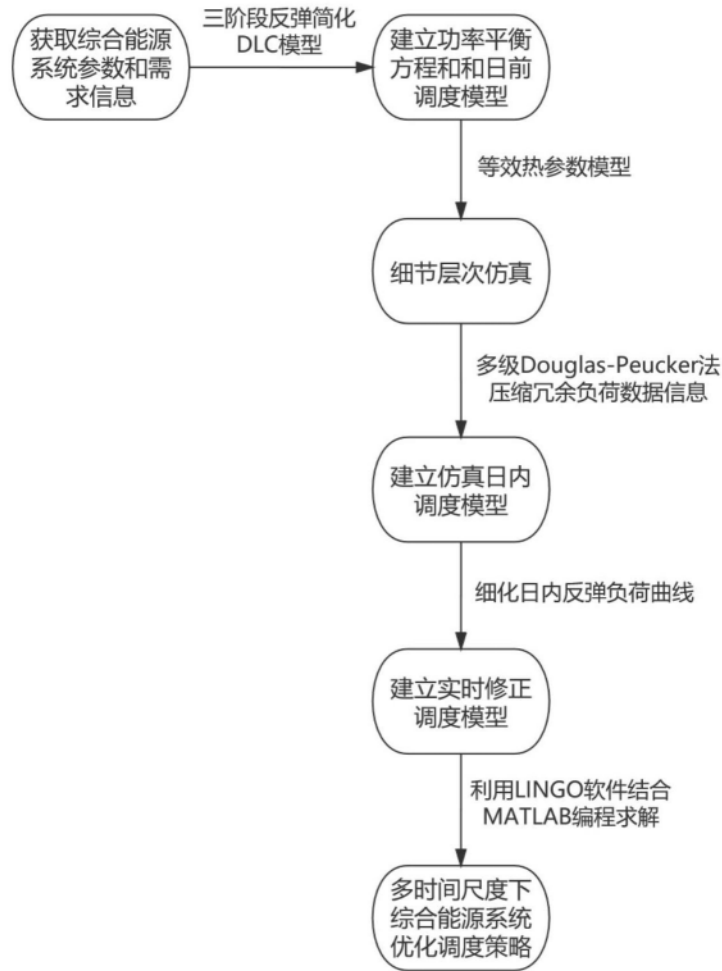


图1

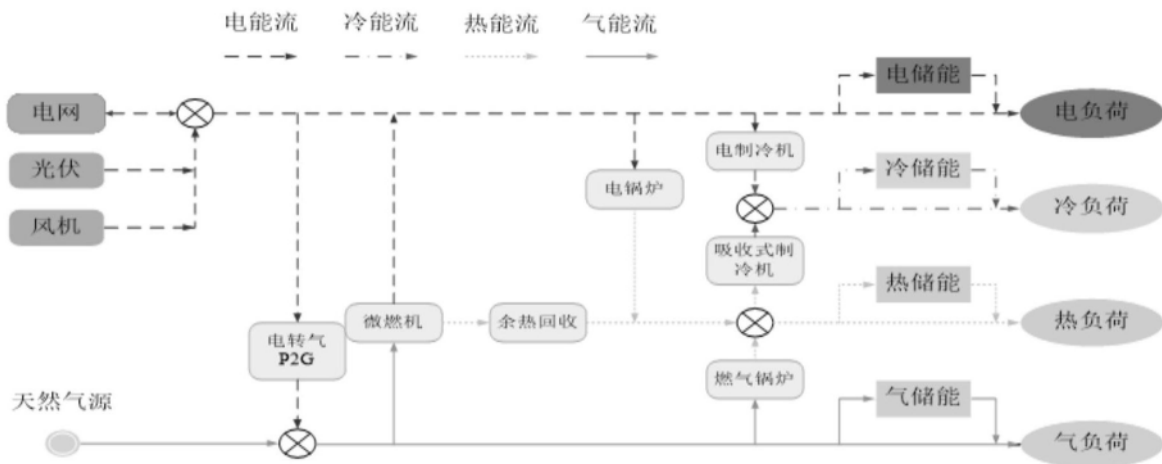


图2

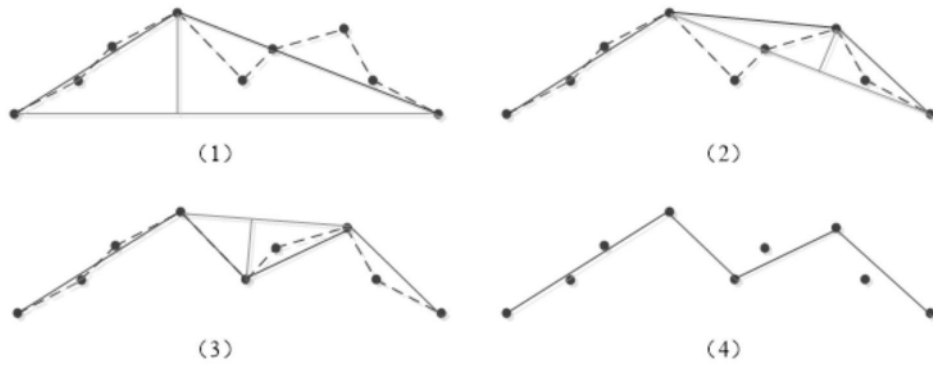


图3

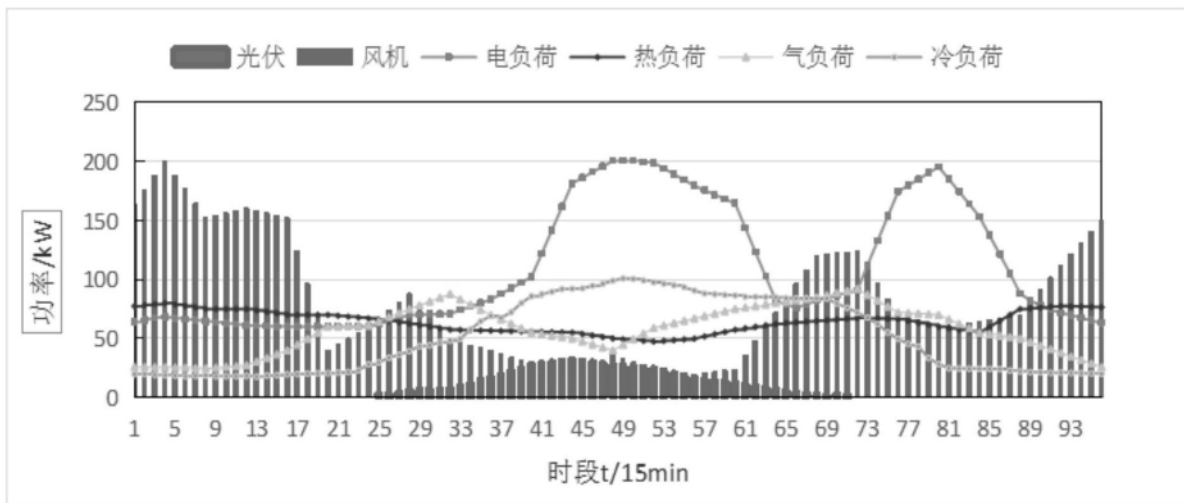


图4

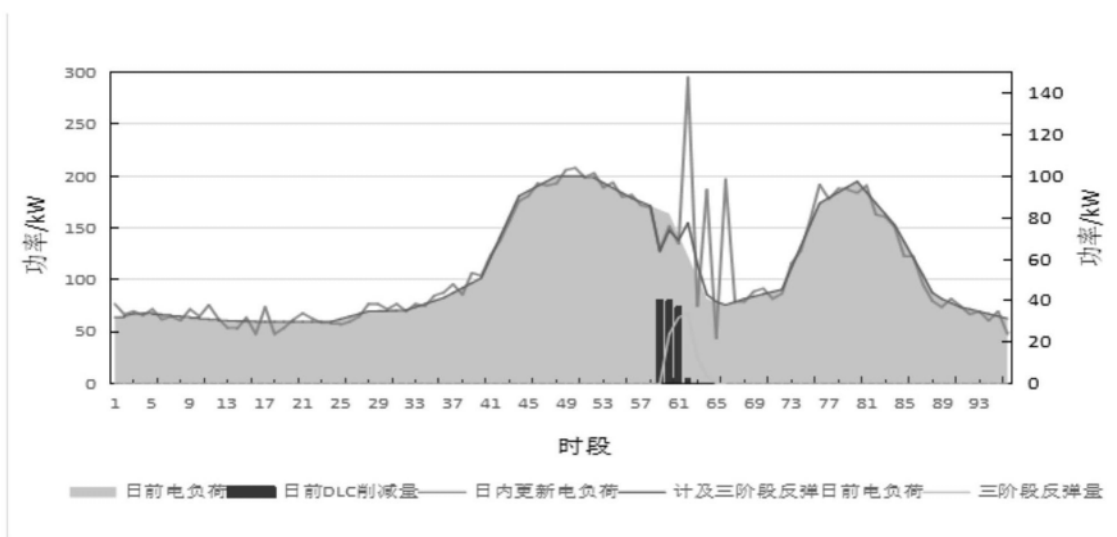


图5

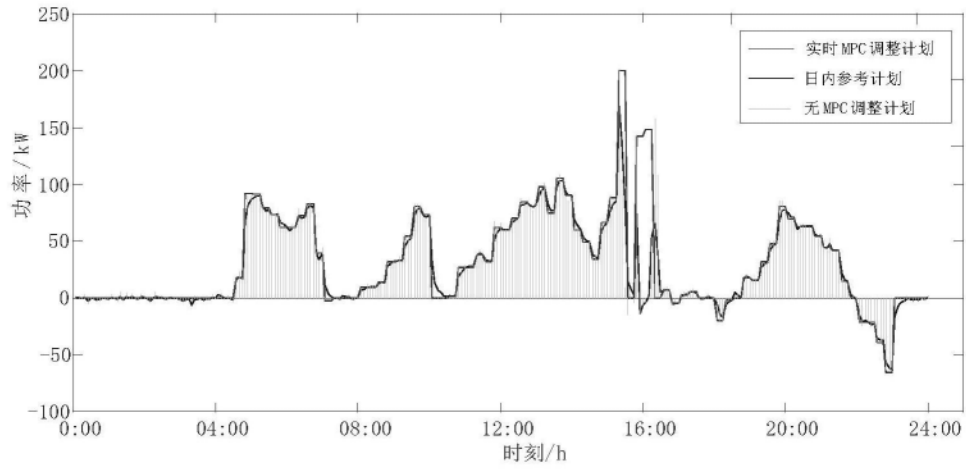


图6