含电转气和混合储能的微能网双层滚动优化控制方法

陈飞雄^{1,2},林炜晖^{1,2},邵振国^{1,2}

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108;2. 福建省电器智能化工程技术研究中心,福建 福州 350108)

摘要:微能网是实现多能互补的有效技术手段之一。以包含电转气和电池-超级电容器混合储能系统的电-热-气联供型微能网为研究对象,针对风光出力和负荷不确定性导致系统优化控制结果可信度较低的问题, 基于模型预测控制的滚动优化思想,提出包含长时间尺度滚动优化层和短时间尺度实时滚动调整层的多时 间尺度双层滚动优化控制方法。其中,上层以系统运行经济性最优为目标,通过多步滚动求解制定长时间尺 度调度计划;下层以跟踪和修正上层调度计划为目标,并在短时间尺度滚动优化平滑功率波动的基础上,引 入超级电容器,进一步应对风光和负荷短时间尺度的功率波动。分析结果表明,电转气和超级电容器在提高 微能网消纳能力和平抑系统功率波动方面具有显著作用,同时双层滚动优化控制方法在保证微能网经济运 行的前提下,能够有效应对不确定因素对系统优化控制的影响。

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202017

0 引言

微能网是提高能源利用效率的有效途径之一^[1],给低碳可持续能源系统的构建带来了新机会, 为碳减排提供了新思路^[2-3]。电转气 P2G(Power-to-Gas)技术的应用促进了可再生能源并网和微能网的 耦合程度^[4],为消纳可再生能源提供了新途径^[5-6]。

关键词:微能网;混合储能;电转气;滚动优化;多时间尺度

目前,可再生能源出力和负荷需求的不确定性 给微能网的优化控制带了较大挑战。为此,诸多研 究学者将模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)引入微能网的优化控制中,以应对系统多重不 确定性。文献[7-8]针对电热多能源系统,采用MPC 有效地解决了预测误差导致的电热多能源系统优化 调控方案与实际运行场景偏差较大的问题。文献[9] 提出基于 MPC 的家庭能源局域网能量管理策略,实 现了能量的优化分配。上述文献均采用单一时间尺 度的MPC优化控制方法,即采用短时间尺度或长时 间尺度的MPC优化控制方法。采用单一时间尺度 的MPC优化控制方法虽然在不确定环境下具有较 强的鲁棒性,但存在一定的局限性,具体表现为:当 采用短时间尺度的MPC优化控制方法时,为保证系 统制定更符合实际运行情况的调度计划,需选取较 长的预测时域使MPC模型包含更丰富的未来信息

收稿日期:2021-06-09;修回日期:2021-12-23 在线出版日期:2022-02-28

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52107080);福建省 自然科学基金青年项目(2021J05135);福州市科技创新平台 项目(2020-PT-143)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52107080), the Natural Science Foundation of Fujian Province(2021J05135) and the Science and Technology Innovation Platform Program of Fuzhou City(2020-PT-143) 量,然而当预测时域较长时,MPC模型难以获取未来 所有调度时段内较为精确的预测数据^[10];当采用长 时间尺度的MPC优化控制方法时,由于长时间尺度 的MPC的预测精度较低,因此其会导致优化控制结 果的准确度降低。

采用多时间尺度的优化控制方法通过逐步缩短 时间尺度,削减不确定性因素对优化控制结果的影 响,可有效解决上述问题。文献[11]考虑了异质能 流的传输特性差异和源 / 荷多重不确定性,构建了 "日前调度计划-日内滚动出力计划-实时调度"三 阶段调度体系,对异质能流进行了不同时间尺度的 调度;文献[12-13]基于MPC方法对多能互补系统进 行了日前与日内滚动校正相结合的多时间尺度优化 调度。文献[11-13]均是采用基于日前优化调度与 日内MPC滚动优化相结合的多时间尺度优化控制 方法,在一定程度上增强了系统对预测信息不准确 的适应性,但是日前优化调度下发的计划与实际运 行情况存在较大偏差,不利于日内滚动优化跟踪日 前调度计划。此外,上述文献主要采用电池作为电 储能设备。然而,可再生能源发电和负荷预测在不 同的时间尺度下存在不同的波动特征,采用单一电 池储能很难在技术经济性上满足其平抑要求[14],因 此在微能网中考虑混合储能具有重要意义。

综上,本文首先构建了含P2G和电池-超级电容 器混合电储能的微能网系统。然后,在MPC滚动优 化的思想框架下,将长时间尺度和短时间尺度滚动 优化控制策略进行有机结合,提出了一种多时间尺 度双层滚动优化控制方法。其中,上层长时间尺度 滚动优化层以最小化系统运行成本为目标;下层短 时间尺度实时滚动调整层跟踪并修正上层调度计 划,同时,在短时间尺度 MPC滚动优化平滑系统功 率波动的基础上,根据超级电容器的功率特性,进一步应对风光出力和负荷的瞬时功率波动。最后,通过算例分析验证了超级电容器和P2G对降低系统功率波动和提高系统消纳水平的有效性,并验证了本文所提双层滚动优化方法的有效性。

1 基于MPC的微能网双层滚动优化控制方法

1.1 微能网系统结构

本文构建的微能网主要包含了光伏 PV(Photo-Voltaic)、风机 WT(Wind Turbine)、热电联供 CHP (Combined Heat and Power)系统、P2G设备、燃气锅 炉 GB(Gas Boiler)、电锅炉 EB(Electric Boiler)、电 池-超级电容器混合电储能设备、储热设备和储气设 备,结构如图1所示。光伏、风机、微型燃气轮机和 电储能设备用于满足用户的电负荷需求,缺额部分 可通过向电网购电获得,超级电容器用于平抑系统 电功率波动;电锅炉、燃气锅炉、余热回收锅炉和储 热设备主要用于满足用户的热负荷需求,其中余热 回收锅炉用于回收微型燃气轮机发电后排出的余 热,实现能源的梯级利用。本文研究的微能网内所 涉及的设备的数学模型见附录A。



图1 微能网系统结构图

Fig.1 Structure of multi-energy microgrid system

1.2 微能网双层滚动优化控制框架

为应对风光出力和负荷需求预测不准确的问题,适应预测误差随预测时间尺度缩短而减小的特性,本文采用双层滚动优化的多时间尺度优化控制 方法对微能网进行优化控制,以时段最优代替全局 最优,在上层实现最小化系统运行成本的同时,在下 层实现跟踪上层调度计划并降低预测误差对系统影 响的目标。依据上下层不同的优化控制目标,构建 双层滚动优化控制框架如图2所示。值得注意的 是,由于目前已有大量关于风光出力和负荷预测方 法方面的研究,如人工神经网络、时间序列、灰色理 论和卡尔曼滤波等,故关于风光出力和负荷预测数 据,本文采用德国柏林电网公司已有的研究成果,将 基于时间序列预测模型得到的风光出力数据^[15-16]作 为本文进行滚动优化时所用的预测数据。





图2中,上层为长时间尺度滚动优化层,采样时 刻为t_u ∈{0,1,…,T_u-1},T_u为预测时域,Δt_u为上层 控制时间间隔。在t_u时刻,基于未来T_u个控制间隔 内风光出力和电 / 热 / 气负荷需求的小时级预测 数据,综合考虑系统设备运行特性,以最小化系统 运行成本为目标,通过优化求解获得预测时域内微 能网调度计划,并下发第一个控制间隔内的调度计 划值至下层作为参考值。下层为短时间尺度实时滚 动调整层,采样时刻为 $t_i \in \{0, 1, \dots, T_i - 1\}, T_i$ 为预测 时域, Δt_i 为下层控制时间间隔,即下层将上层滚动 优化阶段的控制时间间隔 Δt_{1} 等分为 T_{1} 个控制时间 间隔 Δt_1 。在 t_1 时刻,遵照上层对应时段 Δt_n 的调度计 划和储能设备充放电状态,并基于下层预测时域内 风光出力和负荷需求的分钟级预测数据,对上层调 度计划值进行修正,降低风光出力和负荷需求预测 误差对优化结果精准性的影响,并调度超级电容器 出力,从而进一步平抑风光出力和负荷需求的功率 波动导致的联络线电功率和电池出力波动。在 Δt_{\star} 之后,下层将更新后的状态变量反馈至上层,上层开 始下一个调度问题。如此重复进行上述步骤,直至 生成调度周期内所有时段的调度计划。

1.3 微能网双层滚动优化控制模型

1.3.1 上层长时间尺度滚动优化模型

1)目标函数。

上层滚动优化过程中,优化目标为预测时域内 微能网运行成本最低。目标函数 F₁描述如下:

$$F_{u} = \min \sum_{t_{u}}^{t_{u}+T_{u}-1} (C_{e}^{u}(t_{u}) + C_{g}^{u}(t_{u}) + C_{om}^{u}(t_{u}) + C_{BD}^{u}(t_{u}) + C_{AB}^{u}(t_{u}))$$
(1)

式中: $t_u \in \{0, 1, \dots, T_u - 1\}$ 为上层滚动优化的起始时刻,通过 t_u 依次取 $0, 1, \dots, T_u - 1$,进行上层滚动优 化; $C_e^u(t_u)$ 为微能网与电网交互费用; $C_g^u(t_u)$ 为微能 网购买天然气费用; $C_{om}^u(t_u)$ 为设备维护成本; $C_{DB}^u(t_u)$ 为电池退化成本; $C_{AB}^u(t_u)$ 为弃风弃光惩罚成本。

(1)微能网与电网交互费用。

$$C_{\rm e}^{\rm u}(t_{\rm u}) = c_{\rm e}(t_{\rm u})P_{\rm e}^{\rm net}(t_{\rm u})\Delta t_{\rm u}$$
⁽²⁾

式中: $c_{e}(t_{u})$ 为购售电价格; $P_{e}^{net}(t_{u})$ 为联络线电功率。 (2)微能网购买天然气费用。

 $C_{g}^{u}(t_{u}) = c_{g}(t_{u})P_{g}^{net}(t_{u})\Delta t_{u}$ (3) 式中: $c_{g}(t_{u})$ 为购买天然气价格; $P_{g}^{net}(t_{u})$ 为联络线气 功率。

(3)系统设备维护成本。

$$C_{om}^{u}(t_{u}) = [R_{PV}P_{e}^{PV}(t_{u}) + R_{WT}P_{e}^{WT}(t_{u}) + R_{MT}P_{e}^{MT}(t_{u}) + R_{GB}P_{h}^{B}(t_{u}) + R_{EB}P_{h}^{EB}(t_{u}) + R_{P2G}P_{g}^{P2G}(t_{u}) + R_{B}(P_{e}^{B,c}(t_{u}) + P_{e}^{B,d}(t_{u})) + R_{h}^{S}(P_{h}^{S,c}(t_{u}) + P_{h}^{S,d}(t_{u})) + R_{g}^{S}(P_{h}^{S,c}(t_{u}) + P_{h}^{S,d}(t_{u})) + R_{g}^{S}(P_{h}^{S,c}(t_{u}) + P_{g}^{S,d}(t_{u}))] \Delta t_{u}$$
(4)

式中: R_{PV} 、 R_{WT} 、 R_{MT} 、 R_{GB} 、 R_{EB} 、 R_{P2G} 、 R_{B} 、 R_{h}^{s} 、 R_{g}^{s} 分别为光 伏、风机、微型燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、P2G设 备、电池、储热设备、储气设备的单位功率维护成本; $P_{e}^{PV}(t_{u})$ 、 $P_{e}^{WT}(t_{u})$ 分别为光伏、风机的输出功率; $P_{e}^{WT}(t_{u})$ 为微型燃气轮机的输出电功率; $P_{h}^{GB}(t_{u})$ 为燃 气锅炉产生的热功率; $P_{h}^{EB}(t_{u})$ 为电锅炉产生的热功 率; $P_{g}^{P2G}(t_{u})$ 为 P2G设备输出的天然气功率; $P_{e}^{B,c}(t_{u})$ 、 $P_{e}^{B,d}(t_{u})$ 分别为电池充、放电功率; $P_{h}^{s,c}(t_{u})$ 、 $P_{h}^{s,d}(t_{u})$ 分别为 储热设备充、放气功率。

(4)电池退化成本[17]。

$$\begin{cases} C_{\rm BD}^{\rm u}(t_{\rm u}) = \frac{C_{\rm B}(P_{\rm e}^{\rm B,c}(t_{\rm u}) + P_{\rm e}^{\rm B,d}(t_{\rm u}))\Delta t_{\rm u}}{2L_{\rm B}(d_{\rm B})E_{\rm B}d_{\rm B}\eta_{\rm B}^{\rm c}\eta_{\rm B}^{\rm d}} \\ L_{\rm B}(d_{\rm B}) = a(d_{\rm B})^{b} e^{-cd_{\rm B}} \end{cases}$$
(5)

式中: $C_{\rm B}$ 为电池置换成本; $E_{\rm B}$ 为电池容量; $\eta_{\rm B}^{\circ}, \eta_{\rm B}^{\circ}$ 分 别为电池充、放电效率; $d_{\rm B}$ 为电池放电深度; $L_{\rm B}(d_{\rm B})$ 为电池循环寿命;a, b, c为曲线拟合系数,本文取a=4980、b=1.98、c=0.016。

(5)弃风弃光惩罚成本。

 $C_{AB}^{u}(t_{u}) = \omega_{AB} P_{e}^{AB}(t_{u}) \Delta t_{u}$ (6) 式中: ω_{AB} 为弃风弃光单位成本; $P_{e}^{AB}(t_{u})$ 为弃风弃光 功率。

2)约束条件。

本文构建的微能网系统包括电、热、气3种负荷 需求,因此系统要同时满足这3种负荷的功率平衡 约束。同时,本文还计及系统各单元的出力限制以 及相应的储能约束。

(1)系统功率平衡约束。

对于电、热、气耦合系统,功率平衡约束具体为: $P_{e}^{net}(t_{u})+P_{e}^{PV}(t_{u})+P_{e}^{WT}(t_{u})-P_{e}^{AB}(t_{u})-$

$$P_{e}^{P2G}(t_{u}) - P_{e}^{EB}(t_{u}) + P_{e}^{MT}(t_{u}) - P_{e}^{B,c}(t_{u}) + P_{e}^{N,d}(t_{u}) = P_{e}^{L}(t_{u})$$
(7)

$$P_{h}^{GB}(t_{u}) + P_{h}^{EB}(t_{u}) + P_{h}^{MT}(t_{u}) + P_{h}^{S,d}(t_{u}) - P_{h}^{S,c}(t_{u}) = P_{h}^{L}(t_{u})$$
(8)

$$P_{g}^{net}(t_{u}) + P_{g}^{P2G}(t_{u}) - P_{g}^{MT}(t_{u}) - P_{g}^{GB}(t_{u}) - P_{g}^{S,c}(t_{u}) + P_{g}^{S,d}(t_{u}) = P_{g}^{L}(t_{u})$$
(9)

式中: $P_{e}^{P2C}(t_{u})$ 为P2G设备的输入功率; $P_{e}^{EB}(t_{u})$ 为电 锅炉消耗的电功率; $P_{h}^{MT}(t_{u})$ 为经余热回收锅炉后微 型燃气轮机制热功率; $P_{g}^{MT}(t_{u})$ 为微型燃气轮机消耗 的气功率; $P_{g}^{CB}(t_{u})$ 为燃气锅炉消耗的气功率; $P_{e}^{L}(t_{u})$ 、 $P_{h}^{L}(t_{u})$ 、 $P_{e}^{L}(t_{u})$ 分别为电、热、气负荷。

(2)与大电网交互功率约束。

微能网与大电网的交互功率需维持在一定范围 内,具体如下:

$$P_{e}^{\min} \leq P_{e}^{net}(t_{u}) \leq P_{e}^{\max}$$

$$P_{g}^{\min} \leq P_{g}^{net}(t_{u}) \leq P_{g}^{\max}$$
(10)

式中: P_{e}^{\max} 、 P_{e}^{\min} 和 P_{g}^{\max} 、 P_{g}^{\min} 分别为微能网与大电网和 天然气网交互功率的上、下限。

(3)弃风弃光约束。

$$0 \leqslant P_{e}^{AB}(t_{u}) \leqslant P_{e}^{WT}(t_{u}) + P_{e}^{PV}(t_{u})$$
(11)
(4)可控机组约束。

可控机组在运行时需要满足运行功率约束和爬 坡约束,具体如下:

$$\begin{cases} P_{\rm MT}^{\rm min} \leq P_{\rm e}^{\rm MT}(t_{\rm u}) \leq P_{\rm MT}^{\rm max} \\ P_{\rm GB}^{\rm min} \leq P_{\rm h}^{\rm CB}(t_{\rm u}) \leq P_{\rm GB}^{\rm max} \\ P_{\rm EB}^{\rm min} \leq P_{\rm h}^{\rm EB}(t_{\rm u}) \leq P_{\rm EB}^{\rm max} \end{cases}$$
(12)
$$\begin{cases} r_{\rm MT}^{\rm d} \Delta t_{\rm u} \leq P_{\rm e}^{\rm MT}(t_{\rm u}+1) - P_{\rm e}^{\rm MT}(t_{\rm u}) \leq r_{\rm MT}^{\rm u} \Delta t_{\rm u} \\ r_{\rm GB}^{\rm d} \Delta t_{\rm u} \leq P_{\rm h}^{\rm CB}(t_{\rm u}+1) - P_{\rm h}^{\rm CB}(t_{\rm u}) \leq r_{\rm GB}^{\rm u} \Delta t_{\rm u} \end{cases}$$
(13)
$$r_{\rm EB}^{\rm d} \Delta t_{\rm u} \leq P_{\rm h}^{\rm EB}(t_{\rm u}+1) - P_{\rm h}^{\rm EB}(t_{\rm u}) \leq r_{\rm EB}^{\rm u} \Delta t_{\rm u} \end{cases}$$

式中: P_{MT}、P_{MT}和 P_{GB}和 P_{GB}、P_G 以及 P_{EB}、P_{EB}分别为微型 燃气轮机和燃气锅炉以及电锅炉出力的上、下限; r^u_{MT}、r^d_{MT}和 r^v_{GB}、r^d_{GB}以及 r^u_{EB}、r^d_{EB}分别为微型燃气轮机和 燃气锅炉以及电锅炉爬坡速率的上、下限。

(5)P2G设备约束。

P2G设备主要受其额定功率的约束,具体如下: $0 \leq P_{PPC}(t_n) \leq P_{PPC}^R$ (14)

式中:P^R_{P2G}为P2G设备的额定功率。

(6)储能设备约束。

储能设备运行受储能占比和最大充放能功率约 束。由于同一时刻储能设备只能进行充能或放能, 因此,引入0/1布尔变量用于表示储能设备充放能 状态。考虑到下一个调度周期的优化控制方案的制 定,调度结束时储能设备的储能占比需恢复至初始 储能占比。

电池储能设备约束如下:

$$\begin{cases} S_{\rm B}^{\min} \leq S_{\rm B}(t_{\rm u}) \leq S_{\rm B}^{\max} \\ 0 \leq P_{\rm e}^{\rm B,c}(t_{\rm u}) \leq U_{\rm B}^{\rm c}(t_{\rm u}) P_{\rm e}^{\rm B,c,\max} \\ 0 \leq P_{\rm e}^{\rm B,d}(t_{\rm u}) \leq U_{\rm B}^{\rm d}(t_{\rm u}) P_{\rm e}^{\rm B,d,\max} \\ U_{\rm B}^{\rm c}(t_{\rm u}) + U_{\rm B}^{\rm d}(t_{\rm u}) = 1 \\ U_{\rm B}^{\rm c}(t_{\rm u}), U_{\rm B}^{\rm d}(t_{\rm u}) \in \{0,1\} \\ S_{\rm B}(0) = S_{\rm B}(T_{\rm N}) \end{cases}$$
(15)

式中: $S_{\rm B}(t_{\rm u})$ 为电池储能设备的储能占比; $S_{\rm B}^{\rm max}$ 、 $S_{\rm B}^{\rm min}$

分别为电池储能设备的储能占比上、下限; $P_{e}^{B,c,max}$ 、 $P_{e}^{B,d,max}$ 分别为电池储能设备的充、放电功率限值; $U_{B}^{c}(t_{u})$ 、 $U_{B}^{d}(t_{u})$ 为电池储能设备的充放电状态变量,处于充电状态时 $U_{B}^{c}(t_{u})=1$ 、 $U_{B}^{d}(t_{u})=0$ 、处于放电状态时 $U_{B}^{c}(t_{u})=1$ 。

储热设备约束如下:

$$\begin{cases} S_{h}^{\min} \leq S_{h}(t_{u}) \leq S_{h}^{\max} \\ 0 \leq P_{h}^{S,c}(t_{u}) \leq U_{h}^{c}(t_{u}) P_{h}^{S,c,\max} \\ 0 \leq P_{h}^{S,d}(t_{u}) \leq U_{h}^{d}(t_{u}) P_{h}^{S,d,\max} \\ U_{h}^{c}(t_{u}) + U_{h}^{d}(t_{u}) = 1 \\ U_{h}^{c}(t_{u}), U_{h}^{d}(t_{u}) \in \{0,1\} \\ S_{h}(0) = S_{h}(T_{N}) \end{cases}$$
(16)

式中: $S_h(t_u)$ 为储热设备的储能占比; S_h^{max} 、 S_h^{min} 分别为 储热设备的储能占比上、下限; $P_h^{s,e,max}$ 、 $P_h^{s,d,max}$ 分别为 储热设备的充、放热功率限值; $U_h^e(t_u)$ 、 $U_h^d(t_u)$ 为储热 设备的充放热状态变量,处于充热状态时 $U_h^e(t_u)=1$ 、 $U_h^d(t_u)=0$,处于放热状态时 $U_h^e(t_u)=0$ 、 $U_h^d(t_u)=1$ 。

$$\begin{cases} S_{g}^{\min} \leq S_{g}(t_{u}) \leq S_{g}^{\max} \\ 0 \leq P_{g}^{S,c}(t_{u}) \leq U_{g}^{c}(t_{u}) P_{h}^{S,c,\max} \\ 0 \leq P_{g}^{S,d}(t_{u}) \leq U_{g}^{d}(t_{u}) P_{h}^{S,d,\max} \\ U_{g}^{c}(t_{u}) + U_{g}^{d}(t_{u}) = 1 \\ U_{g}^{c}(t_{u}), U_{g}^{d}(t_{u}) \in \{0,1\} \\ S_{g}(0) = S_{g}(T_{N}) \end{cases}$$
(17)

式中: $S_g(t_u)$ 为储气设备的储能占比; S_g^{max} 、 S_g^{min} 分别为 储气设备的储能占比上、下限; $P_g^{S,c,max}$ 、 $P_g^{S,d,max}$ 分别为 储气设备的充、放气功率限值; $U_g^c(t_u)$ 、 $U_g^d(t_u)$ 为储气 设备的充放气状态变量,处于充气状态时 $U_g^c(t_u)=1$ 、 $U_g^d(t_u)=0$,处于放气状态时 $U_g^c(t_u)=0$ 、 $U_g^d(t_u)=1$ 。 1.3.2 下层短时间尺度实时滚动调整模型

1)目标函数。

在短时间尺度实时滚动优化层,为了体现上层 调度计划的意义,并进一步降低优化结果与实际运 行的偏差,下层细分时间尺度,进行短时间尺度的实 时滚动调整,并通过引入超级电容器,进一步平抑风 光出力和负荷不确定性所导致的功率波动。基于 此,下层以功率修正的惩罚费用和超级电容器在下 层预测时域终端保持最佳储能占比所导致的惩罚成 本之和最小为目标。值得注意的是,最佳储能占比 是为了最大化储能设备平抑下一时刻功率波动的能 力而设定的荷电状态,以往研究中,一般定义储能设 备的最佳储能占比为0.5^[18]。

由于超级电容器的允许循环次数远大于电池, 故本文不计超级电容器的退化成本和维护成本^[19]。 目标函数如下:

$$F_{1} = \min \sum_{t_{1}}^{t_{1}+T_{1}-1} (C_{p}^{1}(t_{1})+C_{sc}^{1}(T_{1}))$$
(18)

式中: $t_1 \in \{0, 1, \dots, T_1 - 1\}$ 为下层滚动优化的起始时刻,通过 t_1 依次取 $0, 1, \dots, T_1 - 1,$ 进行下层滚动优化; $C_p^l(t_1), C_{sc}^l(T_1)$ 分别为功率修正惩罚费用和在下层预测时域终端,超级电容器保持最佳储能占比所导致的惩罚成本。

(1)功率修正惩罚成本。

$$C_{p}^{l}(t_{1}) = \mu_{e}^{l} \left(P_{e}^{ref} \left(t_{1} + k \left| t_{u} \right. \right) - P_{e}^{l} \left(t_{1} + k \left| t_{u} \right. \right) \right)^{2} + \mu_{g}^{l} \left(P_{g}^{ref} \left(t_{1} + k \left| t_{u} \right. \right) - P_{g}^{l} \left(t_{1} + k \left| t_{u} \right. \right) \right)^{2} + \sum_{i=1}^{N_{s}} \mu_{i}^{l} \left(P_{i}^{ref} \left(t_{1} + k \left| t_{u} \right. \right) - P_{i}^{l} \left(t_{1} + k \left| t_{u} \right. \right) \right)^{2} \quad k = \{1, 2, \cdots, T_{1}\}$$

$$(19)$$

式中: N_s 为微能网系统内的设备数; μ_e^l 、 μ_u^l 、 μ_i^l 分别 为对联络线电功率、联络线气功率、设备*i*进行功率 修正的惩罚因子,其中设备指微能网系统的能源转 换设备和储能设备; $P_e^{ref}(t_1+k|t_u)$ 、 $P_e^l(t_1+k|t_u)$ 分别为 联络线电功率的参考值和修正值; $P_g^{ref}(t_1+k|t_u)$ 、 $P_g^l(t_1+k|t_u)$ 分别为联络线气功率的参考值和修正 值; $P_i^{ref}(t_1+k|t_u)$ 、 $P_i^l(t_1+k|t_u)$ 分别为设备*i*的参考值和 修正值。

(2)预测时域终端超级电容器惩罚成本。

$$(T_1) = (S_{\rm SC}^1(T_1) - S_{\rm SC}^{\rm best})^2$$
 (20)

式中: $S_{sc}^{l}(T_1)$ 为下层预测终端超级电容器的储能占比; S_{sc}^{best} 为超级电容器最佳储能占比。

2)约束条件。

 $C_{\rm SC}^{\rm l}$

下层短时间尺度优化层中关于微能网功率平衡 约束、能源转换设备约束、储能设备约束以及弃风弃 光约束与1.3.1节相同。值得注意的是,下层在功率 平衡约束式中需增加超级电容器出力项。本节引入 超级电容器有关约束,具体如下:

$$\begin{cases} S_{\rm SC}^{\min} \leq S_{\rm SC}(t_1) \leq S_{\rm SC}^{\max} \\ 0 \leq P_e^{{\rm SC, c}}(t_1) \leq U_e^{{\rm SC, c}}(t_1) P_e^{{\rm SC, c}, \max} \\ 0 \leq P_e^{{\rm SC, c}}(t_1) \leq U_e^{{\rm SC, d}}(t_1) P_e^{{\rm SC, d}, \max} \\ U_e^{{\rm SC, c}}(t_1) + U_e^{{\rm SC, d}}(t_1) = 1 \\ U_e^{{\rm SC, c}}(t_1), U_e^{{\rm SC, d}}(t_1) \in \{0, 1\} \end{cases}$$
(21)

式中: $S_{\text{sc}}^{\text{sm}}$ 、 $S_{\text{sc}}^{\text{min}}$ 分别为超级电容器的储能占比上、下限; $P_{e}^{\text{sC,e}}(t_{1})$ 、 $P_{e}^{\text{sC,d}}(t_{1})$ 分别为超级电容器充、放电功率; $P_{e}^{\text{sC,e}}(t_{1})$ 、 $P_{e}^{\text{sC,d}}(t_{1})$ 为超级电容器的充、放电功率限值; $U_{e}^{\text{sC,e}}(t_{1})$ 、 $U_{e}^{\text{sC,d}}(t_{1})$ 为超级电容器的充放电状态变量,处于充电状态时 $U_{e}^{\text{sC,e}}(t_{1})=1$ 、 $U_{e}^{\text{sC,d}}(t_{1})=0$ 、处于放电状态时 $U_{e}^{\text{sC,e}}(t_{1})=1$ 。

需要指出的是,由于每次执行滚动优化时,MPC 均需采样并更新预测数据系统状态信息,因此起到 了一定的反馈修正作用,可确保滚动优化策略具有 更好的准确性和鲁棒性[20]。

2 算例分析

2.1 仿真条件

本文选取某并网运行的微能网为对象进行算例 分析。上、下层调度周期分别为 $T_N = 24 h$ 、 $T_s = 1 h$, 上、下层控制时间间隔分别为 $\Delta t_u = 1 h$ 、 $\Delta t_1 = 15 min$, 上层预测时域为 $T_u = 24$,下层预测时域为 $T_1 = 4$,本文 中控制时域与预测时域保持一致。24 h内风光出力 和电、热、气负荷预测功率如附录 B 图 B1 所示,微 能网系统运行参数如附录 B 表 B1 所示,储能设备 相关参数如附录 B 表 B2 所示,其他参数如附录 B 表 B3 所示。分时电价具体如附录 B 表 B4 所示,天然气 价格取值为 0.26 元 / (kW·h),弃风弃光单位成本 $\omega_{AB} = 1.7 元 / (kW·h)$ 。本文使用 MATLAB 的 Yalmip 工具箱调用 CPLEX 求解器进行求解。

2.2 不同场景下设备的运行结果分析

为了验证 P2G 设备和超级电容器的优势,设定 微能网在以下3种不同场景下运行:场景1,电储能 系统只含电池储能单元;场景2,电储能系统为电 池-超级电容器混合储能;场景3,在场景2的基础 上,增加P2G设备。

附录 B 图 B2 — B6 展示了在不同场景下,系统 电、热、气优化调度结果。

对于场景1,由附录B图B2-B4可知,当电价 处于谷时段([00:00,07:00)、[23:00,24:00])时,由于 此时购电电价为0.17元/(kW·h),低于天然气价, 因此系统通过向电网大量购电以及自身风机的发电 来满足电负荷需求。由于夜间风电比较充足,电锅 炉作为消耗电能的能源转换设备大量耗电,其产生 的热能用以满足夜间较高的热负荷需求。此时,储 能设备也开始进行储能,其中电池通过充电来支撑 未来用电高峰时段电负荷需求高于风光出力的情 况,储热系统将夜间电锅炉产生的多余热能存储起 来,储气设备则存储气负荷在低谷时段多余的天然 气,起到了削峰填谷的作用。当电价处于平时段 (「07:00,10:00)、「15:00,18:00)、「21:00,23:00))时, 购电电价为0.49元/(kW·h),高于天然气价以及风 机和光伏的发电成本,微能网减少购电量,系统主要 依靠此时风光出力以及热电联产系统产生的电能满 足电负荷需求,热负荷需求则通过燃气锅炉来满足, 并由热电联产系统配合运行。此时,电锅炉出力几 乎为0,电池根据前后时段电价和电负荷状况决策 当前时刻的充放状态,储热设备随着热负荷的波动 进行充放能,储气设备继续存储天然气。当电价处 于峰时段([10:00,15:00)、[18:00,21:00))时,购电电价 上升至0.83元/(kW·h),天然气价远低于购电电价, 微型燃气轮机发电成本比购电价格低,能够进行热 电联供,综合效率较高,因此微型燃气轮机开始大量 消耗天然气供电,并利用发电余热对用户供热,缺额 部分由燃气轮机和电锅炉作为补充,多余热能则通 过储热设备存储。此时,微能网与天然气网的交互 功率达到上限,并且电池与微型燃气轮机配合运行, 释放电能,降低系统在用电高峰时段向大电网购电 成本。因此,在电价峰时段,系统不仅满足了电负荷 需求,而且微能网通过出售过剩电力给大电网以赚 取电费差额,提高了全局经济性。

对于场景2,电功率优化调度结果如附录B图 B5 所示。由于 MPC 是根据实时预测数据对系统进 行动态调整的,所以MPC优化方法本身具有平滑功 率波动的效果,因此在场景1中,联络线电功率已经 较为平滑。在此基础上,场景2引入超级电容器,一 方面,当每小时内联络线电功率未出现波动时,超级 电容器作为储能元件参与系统瞬时功率平衡,保证 系统运行满足优化目标;另一方面,超级电容器会在 联络线电功率波动相对较大的时段做出瞬时响应, 通过快速充放电平抑这些时段内联络线电功率的波 动,保证联络线电功率的变化稳定在小范围内,进而 降低风光出力和负荷需求不确定性给系统带来的负 面影响。此外,通过仿真计算得到系统工作在场景 1和场景2下的总运行成本分别为1484.2、1463.8元, 弃风弃光成本分别为86.93、66.97元。因此,超级电 容器的引入能够在一定程度上减少系统弃风弃光 成本。

附录B图B6为场景3下气功率优化调度结果。 通过仿真计算得到系统在场景3下的总运行成本为 1420.0元,弃风弃光成本为33.90元。结合图B6和 上述成本可知,弃风主要集中在[00:00,07:00]和 [23:00,24:00]时段,这些时段为风电出力高峰期,加 入P2G设备后,在弃风时段通过P2G将电能转化为 天然气,从而进一步降低系统弃风弃光量,使系统的 可再生能源消纳水平显著提升,并且提高了系统经 济性,证明了含P2G的微能网系统在风光消纳方面 具有独特优势。

2.3 不同预测时域下的结果分析

为了验证本文优化控制方法的合理性和有效性,设定上层预测时域T_u=4,8,12,24,48,72这6种对比场景,得到系统运行结果如图3所示。

图 3(a) 描述了电池储能占比在不同预测时域下 的变化趋势。从图中可以看出, 预测时域尚未达到 24时, 电池的储能占比随预测时域的不同发生较明 显变化: 当*T*_u=4,8,12时, 电池储能占比变化范围相 较于其他预测时域更小, 并且预测时域越小, 电池储 能占比的变化范围越小; 当*T*_u=24,48,72时, 电池储 能占比在每一时段的大小基本一致, 这是由于当预 测时域达到 24时, 风光出力、负荷需求和电、气价格



Fig.3 Results of system operation under different prediction horizons

信息分布遵循相似的日模式,使得预测时域的长度 对电池储能占比的影响显著减小。图3(b)表明尽 管预测时域的长度不同,但24h内的平均运行成本 并没有随着预测时域的不同而发生很大的变化,因 此可根据系统实际调度需求灵活选取上层预测时域 的大小。此外,随着上层预测时域的增大,上层计算 时间增加,而下层计算时间基本不变,这是由于上层 预测时域越大,所包含的预测信息越丰富,相应地会 使得上层求解优化问题时计算量增大,而下层预测 时域保持不变,计算复杂度也会相应保持不变。然 而,由于计算时间比相应的时间间隔短得多,因此双 层滚动优化控制方法能够确保在下一个调度时刻到 来之前获得当前时刻的最优调度结果,即具有实时 响应能力,这说明该系统优化问题的求解速度满足 系统的需求。

2.4 不同预测误差下的结果分析

风光出力和负荷预测误差是系统不确定性的重要表现形式,因此有必要分析不同的风光出力和负荷预测误差对系统优化调度结果的影响。图4展示了下层预测数据误差分别为5%、10%、15%、20%时系统的运行结果。图4(a)中,在不同预测误差下电池储能占比曲线基本重合,这表明预测误差的增大对电池储能占比的影响较小,而从图4(b)中可以看出,预测误差的增加会给超级电容器储能的输出带来更多的波动,这是因为平滑电池在短时间尺度内的输出功率波动是实时滚动调整的主要目标之一。 图4(c)表明随着预测误差的增大,24h内的平均运行成本和电池平均退化成本均无显著变化,这是由 于电池主要在上层进行长时间尺度的调度,而下层的瞬时功率平衡则通过调度超级电容器来实现。



Fig.4 Result of system operation under different prediction errors

2.5 与已有优化控制方法的对比分析

为验证本文优化控制方法的优势,在2.2节的场景3下,将基于目前优化调度与日内MPC滚动优化相结合的优化控制方法与本文所提出的双层滚动优化控制方法进行比较,设定了如下2种对比情景:情景1(采用基于日前优化调度与日内MPC滚动优化相结合的优化控制方法),上层为日前优化调度,下层根据日前优化调度计划,基于MPC的滚动优化求解微能网系统日内修正方案;情景2(采用双层滚动优化控制方法),上层为长时间尺度滚动优化,用有限时段的反复滚动优化代替一次离线全时段优化, 下层根据上层调度计划,通过短时间尺度滚动优化对上层计划值进行修正。

由于日前优化调度周期为24h,时间尺度为1h,为保证上层预测时域一致,故在2种情景中均设置上层预测时域*T*_u=24,时间尺度为1h;根据MPC原



(22)

理,每次只下发第一个控制间隔内的调度计划值至 下层作为参考值,故在2种情景中均设置下层预测 时域*T*_i=4,时间尺度为15 min。

以根据实际风光出力、各类负荷需求数据求得的理想运行结果为参照,对比2种情景下根据预测数据求得的微能网联络线电功率、电池出力在每个15 min时段的绝对误差和相对误差。

绝对误差 $e_{a}(t_{1}|t_{u})$ 计算公式为: $e_{a}(t_{1}|t_{u})=P_{f}(t_{1}|t_{u})-P_{a}(t_{1}|t_{u})$

式中: $P_{f}(t_{1}|t_{u})$ 为根据预测数据求解得到的优化结果; $P_{a}(t_{1}|t_{u})$ 为根据实际数据求解得到的理想运行结果。

由于理想运行结果可能出现功率为0的情况, 所以相对误差无穷大,因此,在不改变相对大小的情况下,对理想运行结果进行平移处理,定义相对误差 $e_r(t_1|t_u)$ 为:

$$e_{r}\left(t_{1}|t_{u}\right) = \frac{\left|P_{f}\left(t_{1}|t_{u}\right) - P_{a}\left(t_{1}|t_{u}\right)\right|}{P_{a}\left(t_{1}|t_{u}\right) + P_{s}}$$
(23)

式中: P_s 为设置的平移量,本文取 P_s =1 kW。

2种情景下微能网联络线电功率和电池出力的 每15 min绝对误差和相对误差对比如图5和附录B 图 B7、B8所示。由图可知,总体上情景2下的绝对 误差和相对误差比情景1小很多,原因是基于日前 调度与日内 MPC 滚动优化相结合的多时间尺度优 化控制方法,是将日前调度阶段的调度计划一次性 下发,因此可能出现因可再生能源出力预测精度较 低而导致优化控制方案与实际运行情况偏差较大的 问题。在此基础上,日内滚动根据实时预测数据对







日前调度计划进行修正,这样进行修正后所得到的 实际调度结果也不够准确,进而给微能网和上游网 络的安全运行带来负面影响。而情景2的上层采用 长时间尺度滚动优化方法,系统在进行上层滚动优 化调度时,根据每小时最新风光出力、负荷信息和系 统状态,生成实时计划下发,可以更好地前瞻未来一 段时间的调度需求,因此可提前对可控机组和储能 设备的出力进行调整,使得下层对计划值进行修正 时求解得到的实时调度结果更趋近于理想运行结 果,有效削弱可再生能源和负荷的不确定性影响。 因此,本文提出的双层滚动优化控制方法提升了系 统适应不确定性的能力,并能给出更精确的调度 方案。

通过仿真计算得到2种情景下系统运行成本分 别为1443.4元和1420.0元。可以看出,在运行费用 方面,情景2相对于情景1降低了1.62%,可见本文 采用的双层滚动优化控制方法在保证系统经济运行 的条件下,更能适应系统随机性,制定更精确的调度 决策。

结合图 5(a) 和 2 种情景下系统运行成本可知, 情景 2 的运行成本较情景 1 未有明显降低的原因是 情景 2 下每一时段内的功率绝对误差较小,故运行 成本相较于理想成本的误差也较小。而对于情景 1,绝对误差较大包含优化结果较理想结果偏低和偏 高 2 种情况,则每一时段内的系统的运行成本较理 想成本也会偏低或者偏高,从而可能导致总运行成 本接近理想总成本。因此,较小的绝对误差不一定 会造成总运行成本明显降低。

为进一步验证不确定性环境下双层滚动优化 控制方法的有效性,在上层风光出力和负荷预测 值的基础上,叠加3种不同等级的波动,等级1-3 的波动率分别为10%、20%、30%。通过仿真计算, 对比情景1和情景2下不同波动等级的运行成本:情 景1在3种波动等级下的总运行成本分别为1419.9、 1430.6、1437.2元,情景2在3种波动等级下的总运 行成本分别为1450.8、1481.1、1516.2元。可以看 出,在3种波动等级下,情景1较情景2在运行成本 上分别降低了2.13%、3.42%、5.21%。可见不同波 动等级下采用双层滚动优化控制方法均可有效保证 系统的经济运行,并且随着波动等级的增大,情景1 较情景2的经济性能不断提升,这是因为情景1的上 层是基于日前优化调度的一次离线全时段优化,而 情景2的上层通过滚动时域不断更新系统预测信息 和状态信息,以有限时段最优代替全时段最优,使得 系统在不确定环境下具有更强的鲁棒性。

3 结论

本文构建了含P2G设备和电池-超级电容器混

合储能的微能网系统,在此基础上,针对考虑微能网 不确定性的优化控制问题,提出了一种基于双层滚 动优化的多时间尺度优化控制方法。该方法在保证 系统消纳能力和经济运行的同时,提升了微能网系 统应对不确定性的能力,得到的主要结论如下:

1)随着超级电容器和P2G设备的引入,运行成 本不断减小,系统消纳能力不断提高,体现了本文所 提系统模型的优势;

2)所提双层滚动优化控制方法在不同预测时域 和预测误差下,均能保证微能网平均运行成本基本 保持不变;

3)与日前优化调度结合日内 MPC 滚动优化方 法相比,所提双层滚动优化方法在保证系统运行成 本的前提下,可以更有效地应对系统在不确定性环 境下因日前优化调度对预测精度依赖性强所导致的 调度计划与实际运行场景偏差较大的问题,使得系 统在不确定性环境下具有较强的鲁棒性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1]朱承治,陆帅,周金辉,等.基于电-热分时间尺度平衡的综合 能源系统日前经济调度[J].电力自动化设备,2018,38(6): 138-143,151.

ZHU Chengzhi, LU Shuai, ZHOU Jinhui, et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system based on electricity and heat balance in different time scales[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 138-143, 151.

- [2] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析 与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):3-11.
 CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019, 39(8):3-11.
- [3]陈胜,卫志农,顾伟,等.碳中和目标下的能源系统转型与变 革:多能流协同技术[J].电力自动化设备,2021,41(9):3-12.
 CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems; multienergy flow coordination technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(9):3-12.
- [4] YANG J W, ZHANG N, CHENG Y H, et al. Modeling the operation mechanism of combined P2G and gas-fired plant with CO₂ recycling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(1):1111-1121.
- [5]施泉生,丁建勇,刘坤,等.含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J].电力自动化设备,2019,39(8):269-276,293.
 SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):269-276, 293.
- [6] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
 DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):110-116.
- [7]张风晓,靳小龙,穆云飞,等.融合虚拟储能系统的楼宇微网模

型预测调控方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4420-4428,4642.

ZHANG Fengxiao, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Model predictive scheduling method for a building microgrid considering virtual storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15):4420-4428, 4642.

[8] 刘玉奇,臧传治,王悦,等. 基于随机经济模型预测控制的电热 综合能源系统运行优化[J]. 电力自动化设备,2021,41(7): 14-21.

LIU Yuqi,ZANG Chuanzhi,WANG Yue, et al. Optimal operation of electricity-heating integrated energy system based on stochastic economic model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):14-21.

[9] 张彦,张涛,刘亚杰,等. 基于模型预测控制的家庭能源局域 网最优能量管理研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14): 3656-3666.

ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Optimal energy management of a residential local energy network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3656-3666.

- [10] 李捷,余涛,潘振宁.基于强化学习的增量配电网实时随机调度方法[J].电网技术,2020,44(9):3321-3332.
 LI Jie,YU Tao,PAN Zhenning. Real-time stochastic dispatch method for incremental distribution network based on reinforcement learning[J]. Power System Technology,2020,44(9): 3321-3332.
- [11] 顾伟,陆帅,姚帅,等.综合能源系统混合时间尺度运行优化
 [J].电力自动化设备,2019,39(8):203-213.
 GU Wei,LU Shuai,YAO Shuai,et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):203-213.
- [12] 吴鸣,骆钊,季宇,等.基于模型预测控制的冷热电联供型微
 网动态优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37(24):7174-7184.

WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, et al. Optimal dynamic dispatch for combined cooling heating and power microgrid based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24):7174-7184.

- [13] 王磊,周建平,朱刘柱,等.基于分布式模型预测控制的综合 能源系统多时间尺度优化调度[J].电力系统自动化,2021,45 (13):57-65.
 WANG Lei, ZHOU Jianping, ZHU Liuzhu, et al. Multi-time scale optimization scheduling of integrated energy system based on distributed model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(13):57-65.
 [14] 孙玉树,唐西胜,孙晓哲,等.基于 MPC-HHT 的多类型储能协
- 14] 孙玉树, 唐四胜, 孙皖省, 寺. 基丁 MPC-HH1 的多尖型储能协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9):2580-2588, 2826.
 SUN Yushu, TANG Xisheng, SUN Xiaozhe, et al. Research on

multi-type energy storage coordination control strategy based on MPC-HHT[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2580-2588, 2826.

- [15] Open Power System Data. A free and open data platform for power system modelling[DB / OL]. [2021-06-09]. https://openpower-system-data.org / .
- [16] ENTSO-E. Transparency platform[DB/OL]. [2021-06-09]. https:// transparency.entsoe.eu/? site_preference=normal.
- [17] JU C Q, WANG P, GOEL L, et al. A two-layer energy management system for microgrids with hybrid energy storage considering degradation costs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):6047-6057.
- [18] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策

略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6,184.

DING Ming,LIN Gende,CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):1-6,184.

- [19] 张海涛,秦文萍,韩肖清,等. 多时间尺度微电网能量管理优化 调度方案[J]. 电网技术,2017,41(5):1533-1542.
 ZHANG Haitao,QIN Wenping,HAN Xiaoqing, et al. Multi-time scale optimization scheduling scheme of microgrid energy management[J]. Power System Technology,2017,41(5):1533-1542.
- [20] 王成山,吕超贤,李鹏,等.园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6791-6803,7093.

WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple timescale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6803, 7093.

作者简介:



陈飞雄

陈飞雄(1990—),男,讲师,博士,主要研 究方向为综合能源系统协同优化控制、电力 大数据分析和挖掘等(E-mail:feixiongchen@ fzu.edu.cn);

林炜晖(1998—),女,硕士研究生,主 要研究方向为综合能源系统协同优化控制 (E-mail:1710870641@qq.com);

邵振国(1970—),男,教授,博士,通信 作者,主要研究方向为电网不确定性理论

与方法、电能质量分析与治理、电力大数据理论与方法等 (E-mail:shao.zg@fzu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Two-layer receding horizon optimal control method for multi-energy microgrid with power-to-gas and hybrid energy storage

CHEN Feixiong^{1,2}, LIN Weihui^{1,2}, SHAO Zhenguo^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Smart Electrical Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Multi-energy microgrid is one of the effective technological methods for multi-energy complementation. Taking the electricity-heat-gas multi-energy microgrid with power-to-gas and battery-supercapacitor hybrid energy storage system as the research object, as for the credibility of optimal control results of system is lower due to the uncertainties of wind power output, photovoltaic output and load demand, the multi-time-scale twolayer receding horizon optimal control method that contains long time-scale receding horizon optimization layer and short time-scale real-time receding horizon adjustment layer based on the receding horizon optimal idea of model predictive control is proposed. In this model, the upper layer takes the optimal operating economy of system as the objective, and the scheduling plan in long time-scale is formulated by multi-step receding horizon solution, while the lower layer takes tracing and correcting scheduling plan in upper layer as the objective, and the supercapacitor is introduced to further deal with the power fluctuations of wind power, photovoltaic and load demand in short time-scale based on smoothing the power fluctuation by receding horizon optimization in short time-scale. The analysis results show that the power-to-gas and supercapacitor have significant effects on increasing the absorption ability of multi-energy microgrid and smoothing the power fluctuation of system, meanwhile the two-layer receding horizon optimal control method can mitigate the effects of uncertain elements on optimal control of system under the premise of guaranteeing the economic operation of multi-energy microgrid.

Key words: multi-energy microgrid; hybrid energy storage; power-to-gas; receding horizon optimization; multitime-scale

附录 A: 微能网数学模型

1) 热电联供系统。

典型的热电联供系统包含微型燃气轮机、余热回收锅炉2个部分。热电联供的能源转换模型描述如下:

$$\begin{cases} P_{e}^{MT}(t) = \eta_{ge}P_{g}^{MT}(t) \\ P_{h}^{MT}(t) = \eta_{rec}\eta_{gh}P_{g}^{MT}(t) \end{cases}$$
(A1)

式中: η_{ge} 、 η_{gh} 、 η_{rec} 分别为微型燃气轮机发电效率、制热效率和余热锅炉废热回收效率; $P_{e}^{MT}(t)$ 为t时刻微 型燃气轮机的输出电功率; $P_{h}^{MT}(t)$ 为t时刻经余热回收锅炉后微型燃气轮机制热功率; $P_{g}^{MT}(t)$ 为t时刻微型燃 气轮机消耗的气功率。

2) P2G 技术。

P2G 技术利用电能将 H₂O 和 CO₂转化为 H₂和 CH₄,增强了微能网中电、气耦合程度。然而天然气管道 吸收 H₂的能力有限,因此,本文仅考虑 P2G 产生甲烷,并将甲烷等效视为天然气。P2G 数学模型由能源转 换效率来建立,即:

$$P_{\rm g}^{\rm P2G}(t) = \eta_{\rm P2G} P_{\rm e}^{\rm P2G}(t) \tag{A2}$$

式中: $P_{e}^{P2G}(t)$ 为 t 时刻 P2G 设备的输入功率; η_{P2G} 为 P2G 设备的转换效率; $P_{g}^{P2G}(t)$ 为 t 时刻 P2G 设备输出的 天然气功率。

3) 燃气锅炉和电锅炉。

燃气锅炉和电锅炉分别消耗天然气和电能供热,其能源转换模型描述如下:

$$P_{\rm h}^{\rm GB}(t) = \eta_{\rm GB} P_{\rm g}^{\rm GB}(t)$$

$$P_{\rm h}^{\rm EB}(t) = \eta_{\rm EB} P_{\rm e}^{\rm EB}(t)$$
(A3)

式中: $P_{g}^{GB}(t) \propto P_{h}^{GB}(t)$ 分别为 t 时刻燃气锅炉消耗的气功率和产生的热功率; $P_{e}^{EB}(t) \propto P_{h}^{EB}(t)$ 分别为 t 时刻电锅炉消耗的电功率和产生的热功率; $\eta_{GB} \propto \eta_{EB}$ 分别为燃气锅炉和电锅炉的能源转换效率。

4) 储能设备。

储能设备能够实现能量跨时间转移,从而协调微能网能源功率的平衡。本文中,为将荷电状态的词义推 广至储热和储气设备,统一使用储能占比描述储能设备的剩余容量占额定容量的比例。

电池储能数学模型可表示如下:

$$S_{\rm B}(t) = S_{\rm B}(t-1) + \frac{P_{\rm e}^{\rm B,c}(t)\Delta t\eta_{\rm B}^{\rm c}}{E_{\rm B}} - \frac{P_{\rm e}^{\rm B,d}(t)\Delta t}{\eta_{\rm B}^{\rm d}E_{\rm B}} \quad t \in \{t_{\rm u}, t_{\rm l}\}, \Delta t \in \{\Delta t_{\rm u}, \Delta t_{\rm l}\}$$
(A4)

储热设备数学模型可表示如下:

$$S_{\rm h}(t) = S_{\rm h}(t-1) + \frac{P_{\rm h}^{\rm S,ch}(t)\Delta t\eta_{\rm h}^{\rm c}}{E_{\rm h}} - \frac{P_{\rm h}^{\rm S,dis}(t)\Delta t}{\eta_{\rm h}^{\rm d}E_{\rm h}} \quad t \in \{t_{\rm u}, t_{\rm l}\}, \Delta t \in \{\Delta t_{\rm u}, \Delta t_{\rm l}\}$$
(A5)

式中: E_{h} 为储能设备的额定容量; η_{h}^{c} 、 η_{h}^{d} 分别为储热设备的充、放热效率。

储气设备数学模型可表示如下:

$$S_{g}(t) = S_{g}(t-1) + \frac{P_{g}^{S,ch}(t)\Delta t\eta_{g}^{c}}{E_{g}} - \frac{P_{g}^{S,dis}(t)\Delta t}{\eta_{g}^{d}E_{g}} \quad t \in \{t_{u}, t_{l}\}, \Delta t \in \{\Delta t_{u}, \Delta t_{l}\}$$
(A6)

式中: E_{a} 为储气设备的额定容量; η_{a}^{c} 、 η_{a}^{d} 分别为储气设备的充、放气效率。



图 B1 风光、电/热/气负荷预测出力曲线

Fig.B1 Forecast curves of WT,PV and load demands

表 B1 微能网运行参数

Table B1 Operation parameters of multi-energy microgrid

类型	最小出力/kW	最大出力/kW	下爬坡速率/ (kW·h ⁻¹)	上爬坡速率/ (kW·h ⁻¹)	单位维护成本/ (元· kW ⁻¹)
MT	15	115	5	15	0.025
P2G	0	80	_	_	0.021
GB	0	80	11	11	0.012
EB	0	80	12	12	0.016
PV	0	40	—	—	0.0235
WT	0	100	_	_	0.0196
电网	-100	100	_	—	_
气网	0	250	_	_	_

表 B2 储能设备参数

Table B2 Parameters of energy storage devices

储能类型	初始容量/	额定容量/	最大充放电	单位置换成本/	单位维护成本/	去边应
	(kW·h)	(kW·h)	功率/kW	[元·(kW·h) ⁻¹]	(元·kW ⁻¹)	兀瓜平
电池	30	150	37.5	1600	0.0018	0.9
超级电容器	5	10	100	—	—	0.92
储热装置	0	80	25	—	0.0016	0.9
储气装置	0	80	25	—	0.0017	0.95

表 B3 微能网其他参数

Table B3 Other parameters of multi-energy microgrid				
参数	数值	参数	数值	
$\eta_{ m ge}$	0.26	$\eta_{ m GB}$	0.9	
$\eta_{ m rec}$	0.6	$\eta_{ m EB}$	0.95	
$\eta_{ m gh}$	0.68	$\eta_{ m P2G}$	0.6	

表 B4 分时电价

Table B4 Time-of-use price

	1		
时段	购电价/[元·(kW·h) ⁻¹])	售电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	
峰时段(10:00—15:00,18:00—21:00)	0.83	0.65	
平时段 (07:00—10:00, 15:00—18:00,	0.40	0.38	
21:00-23:00)	0.49		
谷时段(00:00-07:00, 23:00-24:00)	0.17	0.13	



图 B2 场景1电功率优化结果





图 B3 场景 1 热功率优化结果





Fig.B4 Optimization results of gas flow in Scenario 1











图 B7 电池出力绝对误差对比 Fig.B7 Absolute error comparison of battery power output



