

基于 If-Then-Else 规则的热电联产系统能量调度方法

张 昊^{1,2}, 李大华^{1,2}, 田 禾^{2,3}, 高 强^{2,4}

(1. 天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384; 2. 天津市复杂系统控制理论与应用重点实验室, 天津 300384;
3. 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384; 4. 天津理工大学 海运学院, 天津 300384)

摘 要: 为了降低热电联产系统能量调度算法计算的复杂度, 减少计算时间, 提出了一种基于 If-Then-Else 规则的热电联产系统能量调度方法。通过引入逻辑变量来描述设备的启停状态和工作模式, 建立混合逻辑动态模型, 在模型预测控制的框架下, 根据实时电价以及本地能源、电力负荷和热力负荷的预测结果, 为模型中的二元决策变量赋值, 从而将模型中的混合整数线性规划问题转化为线性规划问题。最后, 通过仿真将本文提出的方法和混合整数线性规划方法进行比较, 结果表明, 本文所采用的方法在性能上几乎没有损失, 平均计算时间降低 65%。

关 键 词: 热电联产系统; 能量调度; 模型预测控制; 混合整数线性规划; 线性规划

中图分类号: TM73 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.06.021

[引用本文格式] 张 昊, 李大华, 田 禾, 等. 基于 If-Then-Else 规则的热电联产系统能量调度方法[J]. 热能动力工程, 2022, 37(6): 152-162. ZHANG Hao, LI Da-hua, TIAN He, et al. Energy dispatching method for combined heat and power system based on If-Then-Else rules[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 152-162.

Energy Dispatching Method for Combined Heat and Power System based on If-Then-Else Rules

ZHANG Hao^{1,2}, LI Da-hua^{1,2}, TIAN He^{2,3}, GAO Qiang^{2,4}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin, China, Post Code: 300384;
2. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Application in Complicated Systems, Tianjin, China, Post Code: 300384;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin, China, Post Code: 300384;
4. Maritime College, Tianjin University of Technology, Tianjin, China, Post Code: 300384)

Abstract: In order to reduce the computational complexity and time of the energy dispatching algorithm for combined heat and power system, an energy dispatching method based on If-Then-Else rule was proposed. By introducing a start-stop logic variables to describe the equipment status and working mode, a mixed logic dynamic model was established, in the framework of model predictive control, according to the real-time electricity price and the local energy, electric power load and thermal load forecast results, the values of binary decision variables in the model were assigned, thus the mixed integer linear programming problem of the model was converted into the linear programming problem. Finally, the proposed method was compared with the mixed integer linear programming method through simulation. The results show that the proposed method has almost no performance loss and the average calculation time is reduced by 65%.

Key words: combined heat and power system, energy dispatching, model predictive control, mixed integer linear programming, linear programming

收稿日期: 2021-09-29; 修订日期: 2021-09-30

基金项目: 天津市自然科学基金(18JCQNJC01000); 天津市教委科研计划(2018KJ133); 天津企业科技特派员项目(20YDTPJC01670)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of Tianjin(18JCQNJC01000); Scientific Research Project of Tianjin Municipality Education Commission(2018KJ133); Tianjin Enterprise Science and Technology Commissioner Project(20YDTPJC01670)

作者简介: 张 昊(1995-), 男, 河南南阳人, 天津理工大学硕士研究生。

引 言

碳排放问题是一个制约社会发展的全球性议题,电力行业碳水平直接影响我国碳减排国际承诺的落实。综合能源系统通过集中规划电、气、热和冷等各种类型的能源,提高能源的利用率,达到节能减排的目的^[1]。其中,热电联产(combined heat and power, CHP)和冷热电联产(combined cooling heating and power, CCHP)是综合能源系统中两个典型应用^[2],其经济调度问题需要综合考虑可再生能源预测、多类型负荷、系统参数和能源市场信息等多种因素的影响,并建立有效的调度模型。在实现设备供能与用户负荷平衡的前提下,充分利用各分布式电源的优势,使运行成本最小化^[3-4]。

为了优化微电网内的功率流,必须实施控制策略,模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种成熟的控制方法,被广泛研究并应用于微电网内能量调度^[5]。文献[6]提出了一种基于情景树结构的随机经济模型预测控制策略,并采用一种改进的非线性变化方法建立风电功率非高斯分布模型。文献[7]提出基于模型预测控制的微电网分层调度模型,并通过引入鲸鱼优化算法改善计算速度和精度。文献[8]在运用神经网络构建模型的基础上,采用二次规划的方法求解出目标函数的最优值。文献[9]采用分布式模型预测控制算法,将大型系统分解为多个具有信息交互功能的子系统,将优化问题转化为各个子系统的模型求解,达到降低求解复杂度的目的。在上述研究中, MPC 优化问题都是混合整数线性规划(MILP)问题,尽管可通过现有一些高效的求解器来解决这一类复杂问题,例如 Gurobi 和 CPLEX 求解器^[10-11],但是随着优化变量的增加, MILP 问题的复杂性被认为是指数级增长的^[12],在微电网运行优化时,预测时间为 24 h,整体计算复杂度过高。文献[13-14]研究通过参数化控制输入降低计算复杂度,但在具有整数变量和连续变量的模型中是较难实现的,因为两种变量都需要参数化,并且如果参数化的定律是非线性的,则计算复杂度将得不到改善。为在性能损失较小的情况下节省计算量,本文提出了一种基于 If-Then-Else 规则的

MPC,该方法为系统模型中的二元决策变量赋值,同时优化连续变量,在保证性能的同时,有效降低模型计算的复杂度,以达到减少计算时间的目的。

1 CHP 系统组成及运行思想

CHP 系统的基本组件包括可控型分布式电源微型燃气轮机(micro-turbine, MT)、不可控型分布式电源、混合储能系统(hybrid energy storage systems, HESS)和负载。

其中不可控型分布式电源包括光伏电站和风力发电机。混合储能系统包括电能储存(electric energy storage, EES)和热能储存(thermal energy storage, TES)两部分,电能储存部分又包括蓄电池(battery, B)和超级电容(ultracapacitor, UC)。其中,除了常规负载以外还包括电锅炉(electric boiler, EB)。图 1 为系统的能量传输示意图,箭头代表功率流。

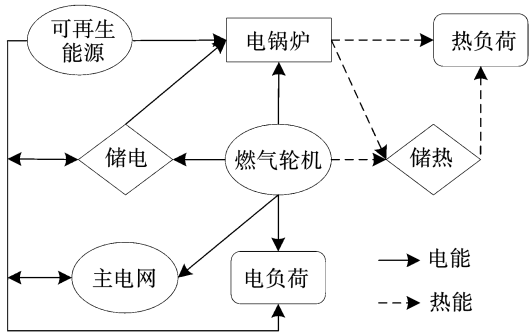


图 1 能量传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy transmission

针对 CHP 系统的强耦合性导致的热、电负荷大小与峰谷时段的时空不匹配问题,在系统中增加储热装置,利用电蓄热的方式消纳多余电能,协调微型燃气轮机、可再生能源发电、储热装置、储能装置以及电锅炉之间实现热电解耦。

CHP 系统能量调度是由 MPC 控制器完成的。包括微型燃气轮机的启停、混合储能系统的储供能、主电网的购售电,其设定点被视为经济调度的优化变量。系统状态变量用 $\mathbf{x}$ 表示;输出变量是设备的实际输出功率,用 $\mathbf{y}$ 表示。优化目标是在确保输出满足各种约束的前提下,最终获得优化后的设定点,使其在固定时间内总运行成本最小化。

2 CHP 系统数学建模

通过引入逻辑变量来表示 CHP 系统主要设备的启动状态和工作模式,建立了主设备的混合逻辑动态模型。

2.1 微型燃气轮机模型

2.1.1 压气机模型

压气机在运行的过程中发生喘振后果十分严重,所以在运行的过程中就需要保证压气机有足够的喘振裕度。压气机的特性以通用特性曲线的形式给出^[15],运行中沿无量纲相似转速线和特性曲线变量线,采用插值方式读取压气机运行点。

$$\begin{cases} \phi_{SM} = \frac{\bar{m} \bar{\pi}_{surge}}{\bar{m}_{surge} \bar{\pi}} \\ \bar{m} = \frac{m \sqrt{RT}/p}{m_d \sqrt{(RT)_d}/p_d} \\ \bar{\pi} = \frac{\pi - 1}{\pi_d - 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ_{SM} —喘振裕度; $\bar{m}$ —无量纲相似流量; $\bar{\pi}$ —无量纲相似压比; m —流量; p —压力; π —压比,下标 surge—喘振线点, d—设计点。

2.1.2 输出功率模型

一般来讲,微型燃气轮机的电功率输出约束为:

$$0 \leq uP_{MT} \leq P_{MT,max} \quad (2)$$

式中: $P_{MT,max}$ —微型燃气轮机的最大输出功率。

由于微型燃气轮机在低负载下的效率非常低,出于经济性考虑,将其可调输出功率范围设置为 $P_{MT,min} \leq uP_{MT} \leq P_{MT,max}$ 。

同时,引入辅助变量 τ 并定义为:

$$\tau = \begin{cases} uP_{MT}, 0 \leq uP_{MT} < P_{MT,min} \\ 0, P_{MT,min} \leq uP_{MT} \leq P_{MT,max} \end{cases} \quad (3)$$

$$uP_{MT} - \tau = \begin{cases} uP_{MT}, P_{MT,min} \leq uP_{MT} \leq P_{MT,max} \\ 0, 0 \leq uP_{MT} < P_{MT,min} \end{cases} \quad (4)$$

引入逻辑变量 δ_{MT} , 微型燃气轮机的工作状态可表示为:

$$\begin{cases} uP_{MT} \geq P_{MT,min}, \delta_{MT} = 1 \\ uP_{MT} \leq P_{MT,min}, \delta_{MT} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

用 $uP_{MT} - \tau$ 作为优化变量,以保证微型燃气轮机能够在低负载下停止工作。

将式(5)中的逻辑命题转化为整数线性不等式, $\delta_{MT} = 1$ 时, $uP_{MT} - P_{MT,min} \geq 0$ 可转化为:

$$\begin{cases} uP_{MT} - P_{MT,min} \geq -P_{MT,min}(1 - \delta_{MT}) \\ uP_{MT} - P_{MT,min} \leq (P_{MT,max} - P_{MT,min})\delta_{MT} \end{cases} \quad (6)$$

如果 $\delta_{MT} = 1$ 则 $\tau = 0$, 否则 $\tau = uP_{MT}$ 可转化为:

$$\begin{cases} \tau = (1 - \delta_{MT}) \cdot uP_{MT} \\ \tau + P_{MT,max}\delta_{MT} \leq P_{MT,max} \\ \tau \geq 0 \\ \tau - uP_{MT} \leq 0 \\ \tau - uP_{MT} + P_{MT,max} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

因此,微型燃气轮机的启停状态和逻辑约束可以表示为式(6)和式(7),优化变量的约束 $P_{MT,min} \leq uP_{MT} - \tau \leq P_{MT,max}$, 其输出功率被限制在 $P_{MT,min}$ 和 $P_{MT,max}$ 之间。

$$\begin{aligned} y_{MT}(k) &= P_{MT}(k) = uP_{MT} - \tau \\ &= [1 \quad -1] \begin{bmatrix} uP_{MT} \\ \tau \end{bmatrix} = D_{1,MT} u_{MT}(k) \end{aligned} \quad (8)$$

微型燃气轮机产生电力的混合逻辑动态模型为:

$$\begin{cases} y_{MT}(k) = D_{1,MT} u_{MT}(k) \\ E_{1,MT} \delta_{MT}(k) + E_{2,MT} u_{MT}(k) \leq E_{3,MT} \end{cases} \quad (9)$$

其中,矩阵 $E_{1,MT}$, $E_{2,MT}$ 和 $E_{3,MT}$ 可由式(6)和式(7)导出; k —时刻。

采用静态过程来计算微型燃气轮机的余热回收量:

$$Q_{MT} = \frac{P_{MT}(k)(1 - \eta_e - \eta_l)}{\eta_e} \quad (10)$$

式中: Q_{MT} —微型燃气轮机的余热回收功率; η_e —微型燃气轮机发电效率; η_l —微型燃气轮机热损失系数; η_{MT} —余热回收效率。

将系统非线性状态方程在平衡点利用泰勒级数展开,可得到连续增量式状态空间模型为:

$$\begin{cases} x_{MT}(k+1) = A_d x_{MT}(k) + B_d u_{Q,MT}(k) \\ y_{Q,MT}(k) = C_d x_{MT}(k) \\ u_{Q,MT}(k) = y_{MT}(k), y_{Q,MT}(k) = Q_{MT}(k) \end{cases} \quad (11)$$

综上,可得具有电功率和热功率的微型燃气轮机混合逻辑动态模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{\text{MT}}(K+1) = \mathbf{A}_{\text{d}}\mathbf{x}_{\text{MT}}(k) + \mathbf{D}_{1,\text{MT}}\mathbf{u}_{\text{MT}}(k) \\ \quad = \mathbf{A}_{\text{MT}}\mathbf{x}_{\text{MT}}(k) + \mathbf{B}_{\text{MT}}\mathbf{u}_{\text{MT}}(k) \\ \begin{bmatrix} y_{\text{MT}}(k) \\ y_{Q,\text{MT}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{C}_{\text{d}} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{\text{MT}}(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{1,\text{MT}} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{MT}}(k) \\ \mathbf{E}_{1,\text{MT}}\boldsymbol{\delta}_{\text{MT}}(k) + \mathbf{E}_{2,\text{MT}}\mathbf{u}_{\text{MT}}(k) \leq \mathbf{E}_{3,\text{MT}} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\mathbf{A}_{\text{MT}}, \mathbf{B}_{\text{MT}}, \mathbf{C}_{\text{MT}}$ 和 $\mathbf{D}_{\text{MT}}$ 可由式(9)、式(11)和式(12)导出。

2.2 混合储能系统模型

在混合储能系统中,储电装置能有效地提供不足电能,吸收过剩电能,稳定可再生能源发电的间歇性和电网潮流的波动性,从而实现供需平衡。储热装置也起到削峰填谷的作用,不仅可以储存燃气轮机发电过程中产生的余热,还可以结合当前电价,在电价较低时利用电锅炉产热。多余热量储存至储热装置中,当系统热负荷需求达到峰值而电力需求又不大时,可以利用热电联产机组产生的电量,一部分用于电锅炉,此时储热装置也能补充一部分热力需求,从而使系统高效经济地运行。

混合储能系统的荷电状态 (state of charge, SOC) 为:

$$\text{SOC}_i(k) = \frac{C_i(k)}{C_{i,\max}} \quad (13)$$

式中: $C_i(k)$ — k 时刻 HESS 当前容量; $C_{i,\max}$ — HESS 最大容量。

储能系统在运行过程中能量不能百分之百传递,因此充放电效率不同。HESS 的离散时间模型表达为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \eta_i P_i(k) T \quad (14)$$

$$\eta_i = \begin{cases} \eta_{i,\text{ch}}, P_i(k) \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_{i,\text{dis}}}, P_i(k) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $i \in (\text{B}, \text{UC}, \text{TES})$; $x_i(k)$ — k 时刻所储存的能量水平; $P_i(k)$ — 储能设备的功率交互值, $P_i(k) \geq 0$ 时表示储能设备储能, $P_i(k) < 0$ 时表示储能设备供能; $\eta_{i,\text{ch}}$ — 储能效率; $\eta_{i,\text{dis}}$ — 供能效率; T — 离散时间系统采样时间间隔。

引入逻辑变量 $\delta_i(k)$, 表示储能设备在 k 时刻

的工作模式。

$$\begin{cases} P_i(k) < 0, \delta_i(k) = 0 \\ P_i(k) \geq 0, \delta_i(k) = 1 \end{cases} \quad (16)$$

引入辅助变量:

$$F_i(k) = \delta_i(k) P_i(k) \quad (17)$$

储能系统的线性模型为:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + T(\eta_{i,\text{ch}} - \frac{1}{\eta_{i,\text{dis}}}) F_i(k) + \\ &\quad \frac{T}{\eta_{i,\text{dis}}} P_i(k) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + T \left[\eta_{i,\text{ch}} \frac{1}{\eta_{i,\text{dis}}} \right] \begin{bmatrix} P_i(k) \delta_i(k) \\ P_i(k) (1 - \delta_i(k)) \end{bmatrix} \\ \quad = \mathbf{A}_i x_i(k) + \mathbf{B}_{1,i} u_i(k) \\ y_i(k) = \left[\eta_{i,\text{ch}} \frac{1}{\eta_{i,\text{dis}}} \right] \begin{bmatrix} P_i(k) \delta_i(k) \\ P_i(k) (1 - \delta_i(k)) \end{bmatrix} = \mathbf{D}_{1,i} u_i(k) \end{cases} \quad (19)$$

此外, HESS 还必须满足以下状态和上下限约束:

$$\begin{cases} \text{SOC}_{i,\min} \leq \text{SOC}_i(k) \leq \text{SOC}_{i,\max} \\ P_{i,\min} \leq P_i(k) \leq P_{i,\max} \end{cases} \quad (20)$$

通过式(19)可得 HESS 的混合逻辑动态模型为:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = \mathbf{A}_i x_i(k) + \mathbf{B}_{1,i} u_i(k) \\ y_i(k) = \mathbf{D}_{1,i} u_i(k) \\ \mathbf{E}_{1,i} \boldsymbol{\delta}_i(k) + \mathbf{E}_{2,i} u_i(k) + \mathbf{E}_{3,i} x_{i,k} \leq \mathbf{E}_{4,i} \end{cases} \quad (21)$$

其中,系数矩阵可由式(19)和式(20)导出。

2.3 电锅炉模型

当微型燃气轮机产生的余热不能满足系统热负荷需求时,由电锅炉辅助提供能源供应。

$$Q_{\text{EB}}(k) = P_{\text{EB}}(k) \eta_{\text{EB}} \quad (22)$$

$$Q_{\text{EB},\min}(k) \leq Q_{\text{EB}}(k) \leq Q_{\text{EB},\max}(k) \quad (23)$$

式中: Q_{EB} — 电锅炉的发热功率; P_{EB} — 电锅炉的耗电功率; η_{EB} — 电锅炉的发热效率; $Q_{\text{EB},\min}$ — 电锅炉产热出力的下限; $Q_{\text{EB},\max}$ — 电锅炉产热出力的上限。

电锅炉模型可以表示为:

$$\begin{cases} y_{\text{EB}}(k) = Q_{\text{EB}}(k) = \mathbf{D}_{1,\text{EB}} u_{\text{EB}}(k) \\ \mathbf{E}_{1,\text{EB}} u_{\text{EB}}(k) \leq \mathbf{E}_{2,\text{EB}} \end{cases} \quad (24)$$

其中系数矩阵可从(21)中导出。

2.4 与主电网的功率交互模型

微电网与主电网相连,功率可以双向流动,假设微电网与主电网进行功率交互时逆变器的功率损耗可以忽略不计,主电网与微电网之间的功率交换约束为:

$$P_{\text{grid},\min} \leq P_{\text{grid}} \leq P_{\text{grid},\max} \quad (25)$$

引入 $\delta_{\text{grid}}(k)$ 表示微电网与主电网在 k 时潮流方向,表达式为:

$$\begin{cases} \delta_{\text{grid}}(k) = 0, P_{\text{grid}}(k) < 0 \\ \delta_{\text{grid}}(k) = 1, P_{\text{grid}}(k) \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_{\text{grid}}(k)$ 一微电网与主电网交互的功率;当 $P_{\text{grid}}(k) < 0$ 表示微电网向主电网出售电量, $P_{\text{grid}}(k) \geq 0$ 表示微电网从主电网购买电量。

将式(26)中逻辑关系表示为:

$$\begin{cases} \text{如果 } \delta_{\text{grid}} = 1, \text{ 则 } P_{\text{pur}} = P_{\text{grid}}, \text{ 否则 } P_{\text{pur}} = 0 \\ \text{如果 } \delta_{\text{grid}} = 1, \text{ 则 } P_{\text{sale}} = 0, \text{ 否则 } P_{\text{sale}} = P_{\text{grid}} \\ \delta_{\text{grid}} = 1, \text{ 则 } P_{\text{pur}} = P_{\text{grid}} \\ \delta_{\text{grid}} = 0, \text{ 则 } P_{\text{sale}} = 0 \end{cases} \quad (27)$$

优化变量的约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{pur}}(k) \leq P_{\text{grid},\max} \\ P_{\text{grid},\min} \leq P_{\text{sale}} \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

与主电网功率交互的逻辑动态模型为:

$$\begin{cases} y_{\text{grid}}(k) = [1 \quad 1] \begin{bmatrix} P_{\text{pur}}(k) \\ P_{\text{sale}}(k) \end{bmatrix} = D_{\text{grid}} u_{\text{grid}}(k) \\ E_{1,\text{grid}} \delta_{\text{grid}}(k) + E_{2,\text{grid}} u_{\text{grid}}(k) \leq E_{3,\text{grid}} \end{cases} \quad (29)$$

系数矩阵可将式(27)中逻辑约束转换为线性约束后联合式(28)导出。

3 成本函数

成本函数包括微型燃气轮机的运行成本 C_{MT} (包括燃料成本), 蓄电池和热能储存的运行以及维护成本 $C_{\text{B}}, C_{\text{TES}}$, 从大电网购买电力的价格 C_{pur} , 以及出售给大电网的价格 C_{sale} 。

因此,成本函数的定义为:

$$J = T \sum_{h=0}^N [C_{\text{MT}} P_{\text{MT}}(h) + C_{\text{B}} (P_{\text{B},\text{ch}}(h) - P_{\text{B},\text{dis}}(h)) + C_{\text{TES}} (P_{\text{TES},\text{ch}}(h) - P_{\text{TES},\text{dis}}(h)) + C_{\text{pur}} P_{\text{pur}} + C_{\text{sale}} P_{\text{sale}}] \quad (30)$$

此外,系统还必须满足功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{\text{MT}}(k) + P_{\text{grid}}(k) + P_{\text{w}}(k) \\ \quad + P_{\text{pv}}(k) - P_{\text{EES}}(k) - P_{\text{load}}(k) = 0 \\ Q_{\text{MT}}(k) + Q_{\text{EB}}(k) - Q_{\text{TES}}(k) - Q_{\text{load}}(k) = 0 \end{cases} \quad (31)$$

式中: $T = 1420/N$ 为采样时间; $P_{\text{MT}}(k), P_{\text{grid}}(k), P_{\text{w}}(k), P_{\text{pv}}(k)$ 和 $P_{\text{EES}}(k)$ 分别为微型燃气轮机、主电网、风力发电机、光伏和储能装置的功率输出; $P_{\text{load}}(k)$ 为电力负载功率; $Q_{\text{MT}}(k), Q_{\text{EB}}(k), Q_{\text{TES}}(k)$ 和 $Q_{\text{load}}(k)$ 分别是微型燃气轮机、燃气锅炉、蓄热装置和热负荷的热能输出。其中, $P_{\text{load}}(k), Q_{\text{load}}(k), P_{\text{pv}}(k)$ 和 $P_{\text{w}}(k)$ 不是优化变量,是通过预测获得的。

根据第2节中建立的数学模型,CHP 系统的逻辑动态模型为:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_1 u(k) + B_2 \delta(k) + B_3 \\ y(k) = Cx(k) + D_1 u(k) + D_2 \delta(k) + D_3 \\ E_1 \delta(k) + E_2 u(k) + E_3 x(k) \leq E_4 \end{cases} \quad (32)$$

其中:

$$\begin{cases} x = [x_{\text{MT}} \ x_{\text{B}} \ x_{\text{UC}} \ x_{\text{TES}}]^T \\ y = [y_{\text{MT}} \ y_{\text{Q,MT}} \ y_{\text{B}} \ y_{\text{UC}} \ y_{\text{TES}} \ y_{\text{grid}} \ y_{\text{EB}}]^T \\ u = [u_{\text{MT}} \ u_{\text{B}} \ u_{\text{UC}} \ u_{\text{TES}} \ u_{\text{grid}} \ u_{\text{EB}}]^T \\ \delta = [\delta_{\text{MT}} \ \delta_{\text{B,cha}} \ \delta_{\text{B,dis}} \ \delta_{\text{UC,cha}} \ \delta_{\text{UC,dis}} \ \delta_{\text{TES,cha}} \ \delta_{\text{TES,dis}} \ \delta_{\text{grid}}]^T \end{cases} \quad (33)$$

CHP 系统的约束为:

$$E_1 \delta(k) + E_2 u(k) + E_3 x(k) \leq E_4 \quad (34)$$

其中,系数矩阵可由逻辑关系、优化变量的上下限和系统的功率平衡约束得到。

综上所述,得到了 CHP 系统的预测模型式(32)、目标函数式(30)和约束条件式(34),然后通过 MPC 进一步制定和解决系统动态调度问题,这是一个 MILP 问题。

4 基于 If-Then-Else 规则的 MPC 控制器

MPC 是一种成熟的控制方法,被广泛研究并成功应用于许多领域。本文中 MPC 的目标是在满足负荷运行要求和约束的同时,实行日前、日内两级优化方法,对系统进行能量优化和调度。优化的目的

是实现系统的最低日常运行成本,包括燃料、运行、维护和电网交互成本。

4.1 日前优化模型

日前优化以 $T_D = 1\text{ h}$ 为调度周期,将下一日等分为 24 个时间段,每个时间段为 1 h,预先制定下一日的混合储能系统、燃气轮机和购售电的基本调度计划,同时确保系统稳定运行。控制目标是最小化控制成本函数,使整个系统运行过程中的经济最优化。经过日前能量优化,得到最优的功率调度以及相应的控制变量和状态,这些确定的变量被设置为日内优化模型中的参考值。

4.2 日内优化模型

图 2 所示,日内优化为等时间步长滚动优化调度,日内优化将接下来的 1 个时段 T 分为 n 个时间段,每个时间段 $T_i\text{ min}$,在两个相邻的日前优化调度周期间隔时间内,日内优化将以滚动方式执行,对负荷数据的变化实时跟踪,及时修正日前计划。日内优化模型的优化目标与日前相同,由于时间步长较小,所有可控单元将根据实时情况进行更精确的优化。该函数施加状态变量以跟踪由长期优化确定的最佳目标值。在求解日内优化控制模型的过程中需要应用到 4.3 中的 If-Then-Else 规则,即二元决策变量的赋值,以此来降低计算复杂度。

实际运行与预测值的偏差将尽可能通过灵活储能系统来平衡,保证系统的功率平衡。

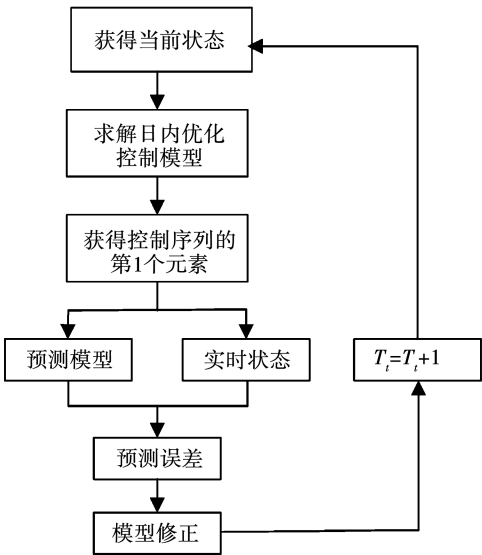


图 2 日内优化过程
Fig.2 Intraday optimization process

4.3 二元决策变量的赋值

基于 If-Then-Else 规则的 MPC 控制器,就是在优化连续变量的同时,给模型中的二元决策变量赋值,这样就将 MILP 问题转化为 LP 问题,因为二进制变量是在优化之前分配的,所以节省了计算量。接下来分析控制器采取某些动作的原因,即在优化问题的过程中是什么因素触发了二元决策变量的分配。

在所考虑系统中,要优化的经济成本式(30)取决于两个主要量:本地生产的电力和与主电网交换的电力,这两种投入在成本函数中分别由当地生产能源价格和购售电价格加权所决定。其中生产价格成本 $C_{\text{prod}} = C_{\text{MT}}$ 和 P_{MT} 直接在成本函数式(30)中,同时 P_{grid} 也在式(28)中间接体现。

除了这两个量以外,系统还必须满足式(31)中功率平衡约束。因此,控制器做出的决定是基于对这些约束的满足。由于可再生能源生产成本被认为是零,因此在成本函数式(30)中,只考虑了边际成本和收入,而不考虑固定成本。为了使成本最小化,控制器将首先尝试用可再生能源满足负荷,并且只有当该电力不够时,它将从主电网购买电力,或者通过可调度单元在本地生产电力。如果可再生能源产生的电力高于负荷所需的电力,那么剩余的电力可以储存在电池中,或者出售给主电网。此外,还必须区分微电网是否能够完全满足本地需求,即是否有必要从主电网获取电力。然后,可以通过观察微电网是否能够满足负荷来确定二元决策变量的值。判断是否 $P_{\text{MT}} + P_{\text{res}} < P_{\text{load}}$ 以及是否 $P_{\text{res}} > P_{\text{load}}$ 。然后,再判断能源成本价格,是否 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}}$, $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$ 或者 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$, 其中 $P_{\text{res}} = P_{\text{w}} + P_{\text{pv}}$ 。基于此,可分为 9 种情形,如表 1 所示。

(1) $P_{\text{load}} \leq P_{\text{res}}$ 且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}}$ 。在这种情况下,可再生能源所产生的电能可以满足负荷的需求。由于 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}}$,所以启动微型燃气轮机,以最大输出功率 $P_{\text{MT,max}}$ 发电。此外,由于能量过剩,HESS 也可以储存能量,作为备用供以后使用。同时,将多余的电能出售给主电网。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 0, \delta_{\text{MT}} = 1, \delta_{\text{HESS}} = 1$ 。

(2) $P_{\text{load}} \leq P_{\text{res}}$ 且 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$ 或者 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$ 。在这种情况下,可再生能源所

产生的电能就可以满足负荷的需求,由于能量过剩,所以允许 HESS 储能,并将多余的电量出售给主电网。同时,因为 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}}$,所以关闭微型燃气轮机。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 0, \delta_{\text{MT}} = 0, \delta_{\text{HESS}} = 1$ 。

(3) $0 < P_{\text{load}} - P_{\text{res}} < P_{\text{MT,min}}$ 且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}}$ 。在这种情况下,可再生能源所产生的电能不足以满足负荷的需求,并且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,所以启动微型燃气轮机。由于 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}}$,所以微型燃气轮机以最大输出功率 $P_{\text{MT,max}}$ 发电,在保证负荷供电的同时,HESS 也可以储存能量,作为备用供以后使用。同时,将多余的电能出售给主电网,获得收入。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 0, \delta_{\text{MT}} = 1, \delta_{\text{HESS}} = 1$ 。

(4) $0 < P_{\text{load}} - P_{\text{res}} < P_{\text{MT,min}}$ 且 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$ 。在这种情况下,可再生能源所产生的电能不足以满足负荷的需求,并且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,所以启动微型燃气轮机。由于 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}}$,所以微型燃气轮机以最小输出功率 $P_{\text{MT,min}}$ 发电,同时 HESS 也可储存多余能量。同时,将多余的电能出售给主电网,获得收入。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 0, \delta_{\text{MT}} = 1, \delta_{\text{HESS}} = 1$ 。

(5) $0 < P_{\text{load}} - P_{\text{res}} < P_{\text{MT,min}}$ 或 $P_{\text{MT,min}} \leq P_{\text{load}} - P_{\text{res}}$

$\leq P_{\text{MT,max}}$ 且 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$ 。在这种情况下,可再生能源所产生的电能不足以满足负荷的需求。由于 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$,所以关闭微型燃气轮机,同时,HESS 释放能量,并且从主电网购买不足的电能。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 1, \delta_{\text{MT}} = 0, \delta_{\text{HESS}} = 0$ 。

(6) $P_{\text{MT,min}} \leq P_{\text{load}} - P_{\text{res}} \leq P_{\text{MT,max}}$ 且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}}$ 。在这种情况下,可再生能源所产生的电能不足以满足负载的需求,由于 $C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,所以启动微型燃气轮机,并以最大发电功率 $P_{\text{MT,max}}$ 发电。由于 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}}$,所以微型燃气轮机以最大输出功率 $P_{\text{MT,max}}$ 发电。同时 HESS 可以充电,多余的电能则出售给主电网。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 0, \delta_{\text{MT}} = 1, \delta_{\text{HESS}} = 1$ 。

(7) $P_{\text{MT,min}} \leq P_{\text{load}} - P_{\text{res}} \leq P_{\text{MT,max}}$ 且 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$ 。在这种情形下,可再生能源所产生的电能不足以满足负荷的需求,并且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,所以启动微型燃气轮机。由于 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}}$,所以微型燃气轮机只产生必要的电能。同时,HESS 处于储能模式,多余的电能可以出售给主电网。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 0, \delta_{\text{MT}} = 1, \delta_{\text{HESS}} = 1$ 。

表 1 If-Then-Else 规则下二元决策变量的赋值

Tab. 1 Assignment of binary decision variables under the If-Then-Else rules

参 数	$P_{\text{load}} \leq P_{\text{res}}$	$0 < P_{\text{load}} - P_{\text{res}} < P_{\text{MT,min}}$	$P_{\text{load}} - P_{\text{res}} \leq P_{\text{MT,max}}$ 且 $P_{\text{MT,min}} \leq P_{\text{load}} - P_{\text{res}}$	$P_{\text{load}} - P_{\text{res}} > P_{\text{MT,max}}$
$C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}}$	情形 1 微型燃气轮机:启动,发电功率为 $P_{\text{MT,max}}$ 混合储能系统:储能 潮流方向:售电	情形 3 微型燃气轮机:启动,发电功率为 $P_{\text{MT,max}}$ 混合储能系统:储能 潮流方向:售电	情形 6 微型燃气轮机:启动,发电功率为 $P_{\text{MT,max}}$ 混合储能系统:储能 潮流方向:售电	情形 8 微型燃气轮机:启动,发电功率为 $P_{\text{MT,max}}$ 混合储能系统:供能 潮流方向:购电
	情形 2 微型燃气轮机:停止 混合储能系统:储能 潮流方向:售电	情形 4 微型燃气轮机:启动,发电功率为 $P_{\text{MT,min}}$ 混合储能系统:储能 潮流方向:售电	情形 7 微型燃气轮机:启动 混合储能系统:储能 潮流方向:售电	同情形 8
	$C_{\text{sale}} < C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$	情形 5 微型燃气轮机:停止 混合储能系统:供能 潮流方向:购电	同情形 5	情形 9 微型燃气轮机:停止 混合储能系统:供能 潮流方向:购电
		同情形 2		

(8) $P_{\text{load}} - P_{\text{res}} > P_{\text{MT,max}}$ 且 $C_{\text{prod}} < C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}}$ 或 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,在这种情况下,本地电源不足以满足负荷的需求。由于 $C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,所以启动微型

燃气轮机,并以最大发电功率 $P_{\text{MT,max}}$ 发电。同时,HESS 释放能量,并且从主电网购买不足的电能。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 1, \delta_{\text{MT}} = 1, \delta_{\text{HESS}} = 0$ 。

(9) $P_{\text{load}} - P_{\text{res}} > P_{\text{MT,max}}$ 且 $C_{\text{sale}} \leq C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$ 。

在这种情况下,本地电源不足以满足负荷的需求。由于 $C_{\text{pur}} \leq C_{\text{prod}}$,所以关闭微型燃气轮机。同时,HESS 释放能量,并且从主电网购买不足的电能。此时,系统输入 $\delta_{\text{grid}} = 1, \delta_{\text{MT}} = 0, \delta_{\text{HESS}} = 0$ 。

5 仿真分析

对典型 CHP 系统进行仿真分析,其包括 1 台 100 kW 的微型燃气轮机,1 个 40 kW 容量为 300 kW · h 的蓄电池,一台 40 kW 容量为 300 kW · h 的蓄热器,1 台 100 kW 的电锅炉,1 个 125 kW 的光伏电站和 1 个 125 kW 的风力发电机,微电网与外部电网联络的最大功率为 320 kW。可再生能源的输出以及电力负载和热力负荷均由预测模型预测。其中,可再生能源的输出和电力负载预测结果曲线分别为 $P_{\text{res}}, P_{\text{load}}$ (图 3、图 4),热力负荷预测结果曲线为 Q_{load} (图 5、图 6)。表 2 为 CHP 系统的参数,表 3 为不同方法下 CPU 的计算时间。

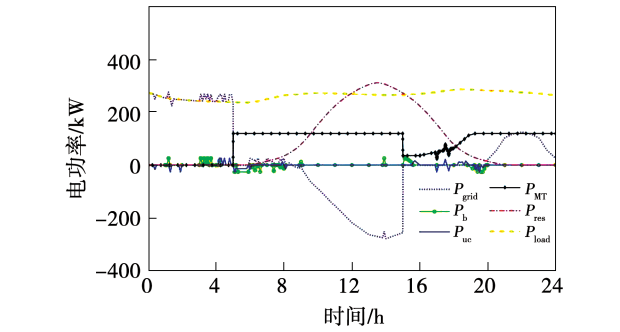


图 3 应用 MILP 方法系统内电功率流

Fig. 3 Electric power flow in the system by the method of MILP

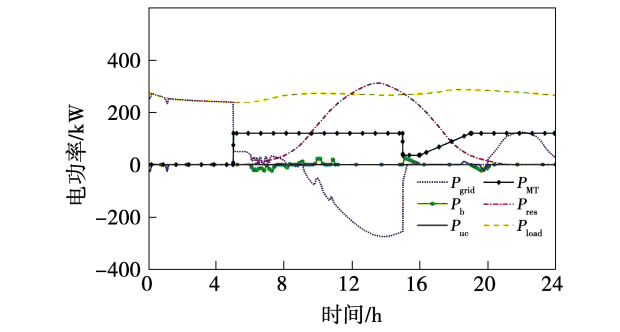


图 4 应用 LP 方法,系统内电功率流

Fig. 4 Electric power flow in the system by the method of LP

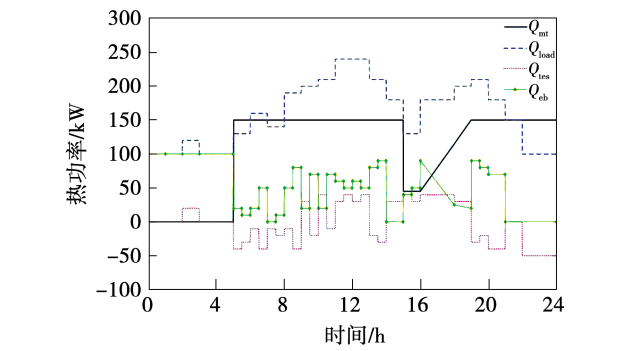


图 5 应用 MILP 方法,系统内热功率流

Fig. 5 Heat power flow in the system by the method of MILP

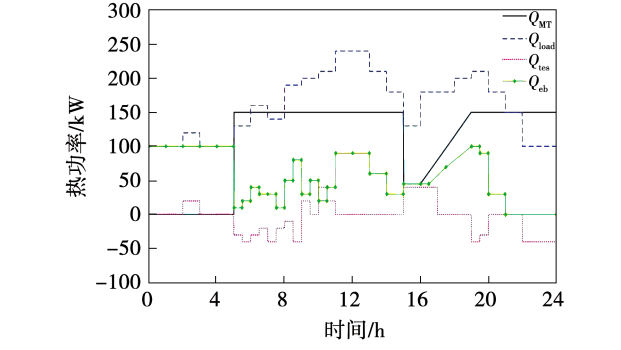


图 6 应用 LP 方法,系统内热功率流

Fig. 6 Heat power flow in the system by the method of LP

表 2 CHP 系统参数	
Tab. 2 CHP system parameters	
参数	数值
$P_{\text{MT,min}}$	30 kW
$P_{\text{MT,max}}$	100 kW
$\eta_{\text{B,ch}}$	0.9
$\eta_{\text{B,dis}}$	0.95
$\text{SOC}_{\text{B,min}}$	0.3
$\text{SOC}_{\text{B,max}}$	0.9
$\eta_{\text{TES,ch}}$	0.9
$\eta_{\text{TES,dis}}$	0.95
$\text{SOC}_{\text{TES,min}}$	0.2
$\text{SOC}_{\text{TES,max}}$	0.9
η_{EB}	0.95
C_{B}	0.006 元/(kW · h)
C_{TES}	0.001 元/(kW · h)

表 3 不同方法下 CPU 计算时间及成本分析

Tab. 3 CPU calculation time and cost analysis under different methods

T/min	n	T_t/min	MILP/s	LP/s	MILP/元	LP/元
30	6	5	$\mu = 35.75 \sigma = 4.29$ $\Delta = 44.21 \nabla = 27.65$	$\mu = 12.58 \sigma = 0.94$ $\Delta = 14.56 \nabla = 11.40$ (-65%)	$\mu = 5\,491 \sigma = 1\,174$ $\Delta = 8\,681 \nabla = 3\,318$	$\mu = 5\,490 \sigma = 1\,183$ $\Delta = 8\,713 \nabla = 3\,297$ (+0.1%)
	30	1	$\mu = 304.12 \sigma = 48.11$ $\Delta = 364.93 \nabla = 203.90$	$\mu = 103.86 \sigma = 13.89$ $\Delta = 112.52 \nabla = 68.89$ (-66%)	$\mu = 5\,837 \sigma = 1\,188$ $\Delta = 9\,207 \nabla = 3\,880$	$\mu = 5\,825 \sigma = 11\,80$ $\Delta = 9\,150 \nabla = 3\,846$ (-0.2%)
60	12	5	$\mu = 38.19 \sigma = 3.12$ $\Delta = 47.37 \nabla = 33.34$	$\mu = 11.17 \sigma = 0.45$ $\Delta = 11.78 \nabla = 10.35$ (-71%)	$\mu = 5\,808 \sigma = 1\,006$ $\Delta = 7\,516 \nabla = 3\,735$	$\mu = 5\,801 \sigma = 1\,010$ $\Delta = 7\,497 \nabla = 3\,722$ (-0.1%)
	60	1	$\mu = 452.62 \sigma = 98.51$ $\Delta = 605.06 \nabla = 201.17$	$\mu = 102.37 \sigma = 12.65$ $\Delta = 112.34 \nabla = 66.37$ (-77%)	$\mu = 5\,683 \sigma = 1\,335$ $\Delta = 8\,942 \nabla = 3\,365$	$\mu = 5\,695 \sigma = 1\,343$ $\Delta = 8\,893 \nabla = 3\,332$ (+0.2%)

对使用第 4 节中提出的应用规则后的 MPC 控制器和标准的 MPC 控制器在日内优化模型不同时间步长的情况下进行比较,在这里将应用规则后的 MPC 控制器简记为 LP,将标准的 MPC 控制器记简为 MILP。图 7 为表 3 中以最低成本价格为目标函数参考的模拟中的电力购买、销售和生產价格。

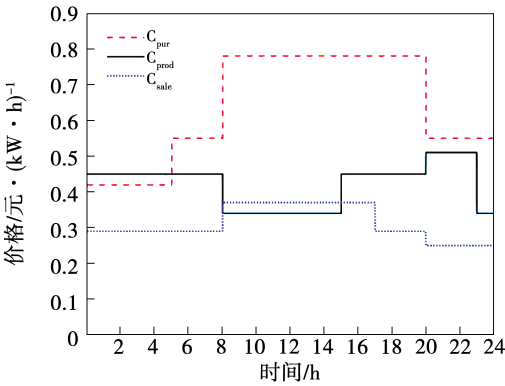


图 7 CHP 系统模拟价格

Fig. 7 Simulation price of CHP system

对每种组合进行了 20 次的模拟,表 3 对模拟结果进行了总结,其中 μ , σ , Δ 和 ∇ 分别表示平均值、标准偏差、最大值和最小值,其中第 5 和第 7 栏展示了不同方法下平均计算节省时间和费用的百分比。

从仿真结果中可以看出对于不同的方法下,其成本差异不大,差异百分比不到 1%。在时间步长

相同,即日内优化预测域 T 和日内优步长 T_t 相同的情况下,应用 LP 方法时,CPU 的计算时间明显低于 MILP 方法。在 $T=30\text{ min}$, $T_t=1\text{ min}$ 时,平均计算节省时间 66%;在 $T=30\text{ min}$, $T_t=5\text{ min}$ 时,平均计算节省时间 65%; $T=60\text{ min}$, $T_t=5\text{ min}$,平均计算节省时间 71%; $T=60\text{ min}$, $T_t=1\text{ min}$ 时,平均计算节省时间 77%。由此可知,此方法可在几乎不影响调度结果的情况下,极大地降低系统计算复杂度。

同时注意到,当时间步长越短,即预测时间 T_t 越小,预测精度越高时,也就意味着二元逻辑变量越多,此时 CPU 的平均计算时间越长,在这种情况下本文所提出的基于规则的 MPC 控制器优势就越明显。

在外界负荷变化时,燃气轮机的参数会发生相应的变化,使燃气轮机处在偏离设计工况的变工况下运行,此时要保证压气机不喘振就需要有足够的喘振裕度。图 8 为过渡过程的压气机喘振裕度曲线,喘振裕度均大于 125%,系统可以安全运行。

图 3 ~ 图 6 为 $T=30\text{ min}$, $T_t=5\text{ min}$ 时,在图 7 的系统模拟价格下,得到的 CHP 系统内功率流。其中,图 3、图 4 为系统内电功率流,图 5、图 6 为系统内热功率流。

在图 3 的模拟价格场景中,电价的选择方式包括了表 1 中的 3 种情况。可以观察到,这两种不同

的方法得到的解决方案非常相似。当 C_{pur} 增加到大于 C_{prod} 时,微型燃气轮机开始以 $P_{\text{MT,max}}$ 生产电力来满足负载运行。此外,在可生能源的生产高峰期,当 $C_{\text{prod}} < C_{\text{pur}}$,两种方法下,微型燃气轮机都产生能量,并将多余的电能出售给主电网。两种方法的不同之处在于,MILP 方法更频繁充放储能系统,除此之外,这两种方法的能量调度非常相似。

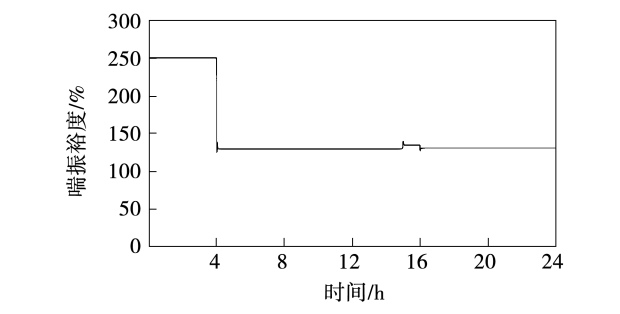


图 8 过渡过程中压气机运行点喘振裕度随时间的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of compressor surge margin at operating point with time during load change

表 4 为 $T = 30 \text{ min}$, $T_i = 5 \text{ min}$ 时,在图 7 的系统模拟价格下,对不同方法中发电机产生的总功率 $P_{\text{MT,total}}$ 、系统总售电量 $P_{\text{sale,total}}$ 、系统总购电量 $P_{\text{pur,total}}$ 进行了对比。从仿真数据结果可以得到,相比较于应用 MILP 方法,应用 LP 方法时,发电机产生的总功率提高了 0.24%,系统总售电量降低了 1.17%,系统总购电量降低了 0.31%。由此可知,这两种方法之间几乎没有区别,没有太大性能上的损失。

表 4 不同方法下功率对比

Tab. 4 Power comparison under different methods

功率/kW	MILP	LP	百分比/%
$P_{\text{MT,total}}$	1670	1674	0.24
$P_{\text{sale,total}}$	597	590	-1.17
$P_{\text{pur,total}}$	980	987	-0.31

6 结 论

提出了一种基于 If-Then-Else 规则的 CHP 系统能量调度方法。系统内主要设备的启停状态和工作

模式由逻辑变量描述,并最终得到系统的混合逻辑动态模型,在进行能量调度前,按照设定好的规则,提前为系统内的二元逻辑变量赋值,从而使得 MILP 问题转换成为 LP 问题,达到通过降低计算复杂度减少计算时间的目的。

仿真结果表明,与传统的标准方法相比,该方法可有效降低计算复杂度,在几乎没有性能损失的情况下,显著降低计算时间,且二元逻辑变量数量越多时,节省的计算时间越多。

参考文献:

[1] 曹 彬,吕干云,王 楠,等. 综合能源系统优化调度下的需求响应研究与应用[J]. 电力需求侧管理,2021,23(4):45-50.
CAO Bin,LYU Gan-yun,WANG Nan,et al. Research and application of demand response based on optimal scheduling of integrated energy system[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(4):45-50.

[2] 沈玉清,郑蕾燕,杨涵文,等. 混合分布式供能系统联产与分产的经济性分析[J]. 热能动力工程,2020,35(4):24-29.
SHEN Yu-qing,ZHENG Pu-yan,YANG Yong-wen,et al. Economic analysis of heat-electricity-cooling trigeneration and separated generation based on hybrid distributed energy supply system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(4):24-29.

[3] 严晓生,吴 迪. CCHP 系统优化配置及与传统热电联产系统的性能对比分析[J]. 中国测试,2020,46(7):159-168.
YAN Xiao-sheng,WU Di. Optimal configuration of CCHP system and performance comparison with traditional cogeneration system[J]. China Measurement & Test,2020,46(7):159-168.

[4] 齐同磊,郑蕾燕,仇中柱,等. 热电同调策略下冷热电联产系统的运行方案优化[J]. 热能动力工程,2021,36(6):112-118.
QI Tong-lei,ZHENG Pu-yan,QIU Zhong-zhu,et al. Research on operation scheme of CCHP system with dual-gas turbines under different operation strategies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(6):112-118.

[5] 李桂鑫,徐 科,刘英英,等. 基于分布式模型预测控制的含分布式储能有源配电网动态电压控制[J]. 电力建设,2021,42(6):116-126.
LI Gui-xin,XU Ke,LIU Ying-ying,et al. Dynamic voltage control based on DMPC for active distribution network with distributed storage systems[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6):116-126.

[6] 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 Yu-qi,ZANG Chuan-zhi,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.

[7] 张 恒,张 靖,肖迎群,等. 基于模型预测的微电网日内分层调度研究[J]. 电力科学与工程,2021,37(4):1-10.

ZHANG Heng,ZHANG Jing,XIAO Ying-qun,et al. Research on intra-day hierarchical dispatching of microgrid based on model prediction[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(4):1-10.

[8] 张 怡,刘 洋,穆 勇. 风光互补发电系统的分布式模型预测控制[J]. 控制工程,2021,28(3):501-509.

ZHANG Yi,LIU Yang,MU Yong. Distributed model predictive control of wind-solar hybrid power generation system[J]. Control Engineering of China,2021,28(3):501-509.

[9] 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 Jian-ping,ZHU Liu-zhu,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.

[10] 蒋争明,关青苗. 基于 CPLEX 和 C++ 语言求解优化问题的过程[J]. 电脑知识与技术,2015,11(23):49-50.

JIANG Zheng-ming,GUAN Qing-miao. Process of solving optimization problem based on CPLEX and C++ language[J]. Computer Knowledge and Technology,2015,11(23):49-50.

[11] 张津玮,顾秀芳. 基于 Gurobi 的抽水蓄能电站优化运行分析[J]. 电气技术,2018,19(2):22-26.

ZHANG Jin-wei,GU Xiu-fang. Analysis on optimized operation of pumped storage power station based on Gurobi[J]. Electrical Engineering,2018,19(2):22-26.

[12] 晏开封,张 靖,何 宇,等. 基于机会约束的微电网混合整数规划优化调度[J]. 电力科学与工程,2021,37(2):17-24.

YAN Kai-feng,ZHANG Jing,HE Yu,et al. The optimal dispatching of mixed integer programming based on opportunity constraint of microgrid[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021,37(2):17-24.

[13] ZEGEYE S K,SCHUTTER B D,HELLENDOM J,et al. A predictive traffic controller for sustainable mobility using parameterized control policies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2012,13(3):1420-1429.

[14] WANG C,ONG C J,SIM M. Model predictive control using segregated disturbance feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2010,55(4):831-840.

[15] 孙 鹏,张君鑫,张善科,等. 船用燃气轮机压气机多级可调节静叶优化匹配方法研究[J]. 热能动力工程,2021,36(5):40-48.

SUN Peng,ZHANG Jun-xin,ZHANG Shan-ke,et al. Research on optimization and matching method of multi-stage variable stator vanes for marine gas turbine compressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(5):40-48.

(金圣迪 编辑)