

区域供冷系统参与电力系统二次调频的控制策略

毛田¹, 周保荣¹, 劳子卿^{2,3}, 赵文猛¹, 刘明波^{2,3}, 王滔¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 3. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 510640)

摘要: 区域供冷系统是一类特殊的、规模化的中央空调负荷, 具有参与电力系统调频的潜力。基于模型预测控制方法提出了一种区域供冷系统参与二次调频的控制策略。首先, 建立了区域供冷系统动态模型和火电系统调频动态模型。然后, 以最小化建筑物温度与人体舒适温度偏差、火电机组调频功率指令和频率偏差为目标, 设计了模型预测控制器优化分配区域供冷系统和火电机组的调频指令。最后, 在含区域供冷系统的10机39节点系统上进行了仿真计算, 结果表明, 区域供冷系统参与调频能够改善系统调频效果, 参与调频也不会对用户舒适度有较大影响。

关键词: 区域供冷系统; 二次调频; 模型预测控制; 比例积分控制

Control Strategy for District Cooling System Participating in Secondary Frequency Regulation of Power Systems

MAO Tian¹, ZHOU Baorong¹, LAO Ziqing^{2,3}, ZHAO Wenmeng¹, LIU Mingbo^{2,3}, WANG Tao¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The district cooling system is a special and large-scale category of central air conditioning load with the potential to participate in the power system frequency regulation. Based on the model prediction control method, a control strategy for the district cooling system is proposed to participate in secondary frequency regulation. First, the dynamic model of district cooling system and the dynamic model of thermal power system frequency regulation are established. Then, with the goal of minimizing the deviation between building temperature and human comfort temperature, thermal power unit frequency regulation commands and the frequency deviation, the model predictive controller is designed to optimally allocate the frequency regulation commands of the district cooling system and thermal power units. Finally, simulations were performed on a 10-unit 39-node system containing district cooling system, and the results show that the participation of district cooling system in frequency regulation can improve the system frequency regulation effect and the participation in frequency regulation does not have a large impact on the user comfort level.

Key words: district cooling system; secondary frequency regulation; model predictive control; proportional integral control

0 引言

随着风光等新能源机组的广泛接入系统转动惯量呈现降低的趋势, 电力系统频率稳定面临着严峻考验^[1-3]。传统调频资源可能难以满足电力系统的

调节需求, 有必要发展新型调频资源^[4]。

在夏季负荷中空调负荷占比较高, 且其短时间的功率变化不会过多地影响建筑温度的变化^[5]。区域供冷系统(district cooling system, DCS)属于一类特殊的、规模化的中央空调负荷, 已成功应用于多个项目^[6], 例如广州大学城、深圳大学城等。与传统中央空调相比, 区域供冷系统覆盖范围更广、冷负荷覆盖范围更大^[7], 更具有参与调频的潜力。

关于区域供冷系统的研究目前主要聚中在节能控制方面, 对于其参与调频的研究相对较少。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077083); 广东省科技计划项目(2022A0505020015)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52077083); the Guangdong Provincial Project of Science and Technology (2022A0505020015)。

文献[8]利用热泵将光伏产生多余的电量转换为区域供冷系统的制冷量, 提出分布式热泵的选址方法。文献[9]提出一种多目标协同优化方法, 考虑多类冷负荷场景, 优化制冷机配置, 降低区域供冷系统的成本。文献[10]提出一种在线多目标优化方法, 在考虑用户舒适度的情况下优化区域供冷系统的运行参数, 降低区域供冷系统能耗。文献[11]基于分时电价或实时电价, 控制水泵的开关状态, 降低冰蓄冷区域供冷系统的运行成本。文献[12]基于无模型深度强化学习提出区域供冷系统日内参与调频市场的策略, 在考虑用户舒适度和调节性能的同时实现收入最大化。文献[13]提出一种基于深度强化学习的控制方法, 在该控制框架下通过控制流量调节区域供冷系统的功率, 既能满足冷却需求又能提供高性能的调节服务。文献[14]提出了一种基于深度强化学习的控制方法, 为有车联网互动(vehicle-to-grid, V2G)的含区域供冷系统的建筑群确定能够参与调频的容量。文献[15]推导了区域供冷系统的频域热电模型, 提出了区域供冷系统参与一次调频的控制策略。上述文献集中于如何对区域供冷系统进行控制, 降低区域供冷系统的运行成本, 但没有详细研究区域供冷系统的控制过程, 也没有对区域供冷系统和火电机组联合参与调频进行仿真。

对于与区域供冷系统具有相似结构的中央空调参与调频的研究, 已取得部分研究成果。目前, 已有文献验证了中央空调参与调频的可行性。文献[16]介绍了中央空调参与调频的控制框架, 通过实验表明变频水泵的功率可在1 s内达到稳定, 可满足调频的需要。文献[17]验证了调节中央空调冷冻水泵频率、调节风扇转速可达到PJM调频市场的准入门槛。文献[18]提出了一种分层优化控制策略, 通过调节室内温度设定值和冷冻水供应温度参与二次调频。文献[19]采用机器学习方法, 重置冷冻水出口温度设定值和室内温度设定值, 提高HVAC(heating, ventilation and air conditioning)系统参与调频的质量。文献[20]通过调整管道静压设定值或建筑物温度设定值实现跟踪频率调节信号的目的, 并比较了这两种方法的调节性能。文献[21]建立了空调负荷参与调频的秒级闭环动态响应模型, 提出中央空调直接参与一次调频的控制策略。文献[22]研究了HVAC系统和电池储能的联合调频, 通过改变空气处理机组风扇的转

速来控制HVAC系统的功率。上述文献采用多种方式对中央空调进行控制, 验证了中央空调可满足参与调频的最低条件, 其控制方法可被部分运用于区域供冷系统的调频控制应用之中。

针对电力系统二次调频问题, 本文首先建立区域供冷系统动态模型和火电系统调频动态模型。然后, 以最小化建筑物温度与人体舒适温度偏差、火电机组调频功率指令和频率偏差为目标, 设计模型预测控制(model predictive control, MPC)器优化分配区域供冷系统和火电机组的调频指令。

1 DCS的电力系统二次调频总体框架

本文所研究的系统包括区域供冷系统、火电机组、交流电网以及普通负荷。当电网中负荷发生波动时会引起电网发电用电不平衡, 从而导致电网频率偏移额定频率^[23-25]。模型预测控制器根据当前时刻以及未来时刻的电网频率、区域供冷系统状态和火电机组状态, 优化分配区域供冷系统和火电机组的二次调频任务, 即给出区域供冷系统的建筑物温度设定值和火电机组的功率变化量。

区域供冷系统参与的电力系统二次调频总体框架如图1所示。其中, $T^{\text{in, set}}$ 和 P^c 分别为经过模型预测控制得到的建筑物温度设定值和火电机组调频指令; Δf 为交流电网的频率偏差。

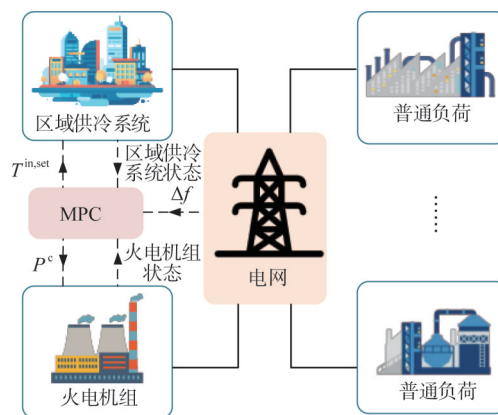


图1 含区域供冷系统的电力系统二次调频总体框架

Fig. 1 Overall framework of secondary frequency regulation of power system with a district cooling system

2 含DCS的电力系统调频动态模型

2.1 区域供冷系统动态模型

如图2所示, 区域供冷系统由能源站、冷冻水

管道、热交换器、建筑物内循环水管道构成。首先由能源站中的制冷机集中制备冷冻水,通过冷冻水管运送到各建筑对应的热交换器中,建筑物内循环水与冷冻水在热交换器中完成热交换,利用冷冻水带来的冷量使建筑降温。此外,冷冻水在热交换器中吸收热量升温,再被重新送入制冷机中进行降温成为低温的冷冻水。

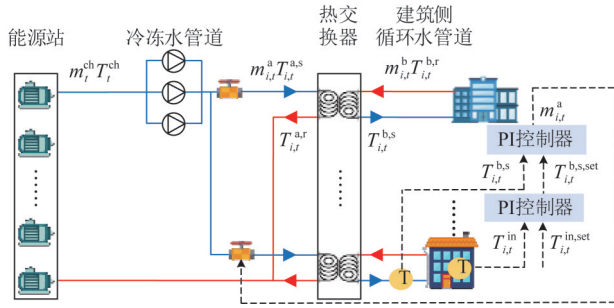


图2 区域供冷系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a district cooling system

1) 热动态过程

以下从能源站产生的冷却功率、冷冻水管中的回水温度、热交换器中交换的热量 and 建筑温度动态方程四个方面对区域供冷系统进行详细的介绍。

制冷机消耗的电功率和其产生的制冷量有如下关系。

$$P_t^{\text{ch}} = \frac{Q_t^{\text{ch}}}{C_{\text{OP}}} \quad (1)$$

式中:

$$Q_t^{\text{ch}} = c^w m_t^{\text{ch}} (T_t^{\text{ch},r} - T_t^{\text{ch},s}) \quad (2)$$

$$m_t^{\text{ch}} = \sum_{i \in I_N} m_{i,t}^a \quad (3)$$

式中: P_t^{ch} 为制冷机的功率, kW; Q_t^{ch} 为制冷量, kW; C_{OP} 为能效比; c^w 为水的比热容, kJ/(kg·°C); m_t^{ch} 为冷冻水总流量, kg/s; $T_t^{\text{ch},r}$ 为回水温度, °C; $T_t^{\text{ch},s}$ 为供水温度, °C; I_N 为建筑物的集合; $m_{i,t}^a$ 为流经第 i 栋建筑物冷冻水管侧的冷冻水流量, kg/s; t 为时间。

冷冻水管中的回水温度由流经各个建筑物的回水温度决定,可按式(4)计算。

$$c^w m_t^{\text{ch}} T_t^{\text{ch},r} = \sum_{i \in I_N} c^w m_{i,t}^a T_{i,t}^{\text{a},r} \quad (4)$$

式中 $T_{i,t}^{\text{a},r}$ 为流经第 i 栋建筑物冷冻水管侧的回水温度, °C。

在热交换器中交换的热量等于冷冻水管侧获得

的热量乘以交换效率,也等于建筑物侧循环水失去的热量。因此,总的交换热量可按式(5)计算。

$$\begin{aligned} Q_{i,t}^a &= c^w m_{i,t}^a (T_{i,t}^{\text{a},r} - T_{i,t}^{\text{a},s}) \eta_i^a \\ &= c^w m_{i,t}^b (T_{i,t}^{\text{b},r} - T_{i,t}^{\text{b},s}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,t}^a$ 为在热交换器中交换的热量, kW; $T_{i,t}^{\text{a},s}$ 为第 i 栋建筑物冷冻水管侧的供水温度, °C; η_i^a 为热交换效率; $m_{i,t}^b$ 为第 i 栋建筑物侧循环水的流量, kg/s; $T_{i,t}^{\text{b},r}$ 为第 i 栋建筑物循环水的回水温度, °C; $T_{i,t}^{\text{b},s}$ 为第 i 栋建筑物循环水的供水温度, °C。

建筑物温度动态可描述如下。

$$D_i^d \frac{dT_{i,t}^{\text{in}}}{dt} = \frac{T_t^{\text{O}} - T_{i,t}^{\text{in}}}{R_i} - \eta_i^b Q_{i,t}^a \quad (6)$$

式中: D_i^d 为建筑物的热惯性, kJ/°C, 与建筑物内的空气重量相关; $T_{i,t}^{\text{in}}$ 为建筑物内的温度, °C; T_t^{O} 为建筑物外的温度, °C; R_i 为建筑物的热阻, °C/kW; η_i^b 为热交换效率。

2) 建筑物温度控制过程

如图2所示,为了调节建筑物的冷却量,需要改变建筑物温度的设定值 $T_{i,t}^{\text{in, set}}$ 。为将建筑物温度 $T_{i,t}^{\text{in}}$ 维持在设定值 $T_{i,t}^{\text{in, set}}$,通过PI控制器调整热交换器建筑物侧供水温度的设定值 $T_{i,t}^{\text{b},s, \text{set}}$ 。为将热交换器建筑物侧供水温度 $T_{i,t}^{\text{b},s}$ 维持在设定值 $T_{i,t}^{\text{b},s, \text{set}}$,再通过另一个PI控制器调整冷冻水管侧的冷冻水流量 $m_{i,t}^a$,从而调整建筑物的冷却量。控制过程传递函数如图3所示。

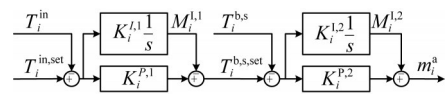


图3 区域供冷系统的控制过程传递函数

Fig. 3 Transfer function of control process for a district cooling system

根据图3所示控制过程传递函数,可列写如下方程。

$$\frac{dM_{i,t}^{1,1}}{dt} = K_i^{1,1} (T_{i,t}^{\text{in, set}} - T_{i,t}^{\text{in}}) \quad (7)$$

$$T_{i,t}^{\text{b},s, \text{set}} = M_{i,t}^{1,1} + K_i^{P,1} (T_{i,t}^{\text{in, set}} - T_{i,t}^{\text{in}}) \quad (8)$$

$$\frac{dM_{i,t}^{1,2}}{dt} = K_i^{1,2} (T_{i,t}^{\text{b},s, \text{set}} - T_{i,t}^{\text{b},s}) \quad (9)$$

$$m_{i,t}^a = M_{i,t}^{1,2} + K_i^{P,2} (T_{i,t}^{\text{b},s, \text{set}} - T_{i,t}^{\text{b},s}) \quad (10)$$

$$T_{i,t}^{\text{in, down}} \leq T_{i,t}^{\text{in, set}} \leq T_{i,t}^{\text{in, up}} \quad (11)$$

式中: $K_i^{P,1}$ 和 $K_i^{P,2}$ 分别为两个PI控制器的比例环节系数; $K_i^{1,1}$ 和 $K_i^{1,2}$ 分别为两个PI控制器的积分环节

系数; $M_{i,t}^{1,1}$ 和 $M_{i,t}^{1,2}$ 分别为两个 PI 控制器中积分环节的输出; $T_i^{\text{in,down}}$ 为建筑物温度的下限, $^{\circ}\text{C}$; $T_i^{\text{in,up}}$ 为建筑物温度的上限, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 火电系统调频动态模型

在二次调频的时间尺度上, 可以假定不同的火电机组是同步的, 因此电网频率偏离额定频率的现象是由总发电和总负荷之间的不平衡引起的。电力系统的系统频率响应动态过程可以描述为:

$$2H \frac{df_t}{dt} = \sum_{l \in L_T} P_{l,t}^m - P_t^{\text{ch}} - P_t^{\text{LD}} - D(f_t - f_0) \quad (12)$$

式中: H 为电力系统等值惯性时间常数, s ; f_t 为系统频率; $P_{l,t}^m$ 为火电机组汽轮机的机械功率; P_t^{ch} 为区域供冷系统的负荷; P_t^{LD} 为除区域供冷系统以外的负荷; D 为频率依赖负荷的阻尼常数; f_0 为系统额定频率; l 为火电机组; L_T 为火电机组集合。

火电机组汽轮机和调速器动态方程可以写为:

$$T_l^m \frac{dP_{l,t}^m}{dt} = P_{l,t}^g - P_{l,t}^m \quad (13)$$

$$T_l^g \frac{dP_{l,t}^g}{dt} = \alpha_l P^c - P_{l,t}^g - \frac{f_t - f_0}{R_l} \quad (14)$$

式中: T_l^m 和 T_l^g 分别为火电机组汽轮机和调速器的时间常数, s ; $P_{l,t}^g$ 为火电机组调速器的输出功率; P^c 为分配给参与调频的火电机组的功率指令; α_l 为火电机组的调频参与因子; R_l 为火电机组的下垂系数。

汽轮机的机械功率还应满足爬坡约束:

$$\left| \frac{dP_{l,t}^m}{dt} \right| \leq r_l^{\text{ramp}} \quad (15)$$

式中 r_l^{ramp} 为汽轮机的爬坡率, p.u./s 。

此外, 引入频率偏差的积分用于描述频率的累计偏差, 作为评价调频效果的指标。

$$\frac{dX_l}{dt} = f_t - f_0 \quad (16)$$

式中 X_l 为频率偏差的积分。

2.3 区域供冷系统和火电机组联合调频离散化动态模型

假设需要求解的动态过程的时间长度为 T , 即后面模型预测控制中的预测时域。以 Δt 为步长, 采用隐式梯形积分法对区域供冷系统和火电机组联合调频动态模型中的微分方程进行离散化。以下以式(1)和(6)为例, 分别介绍代数方程和微分方程的离散化方式。

式(1)是代数方程, 其离散形式与连续形式

相同。

$$P^{\text{ch}}(k) = \frac{Q^{\text{ch}}(k)}{C_{\text{OP}}} \quad (17)$$

式(6)是微分方程, 采用隐式梯形积分法对其进行离散化。

$$T_i^{\text{in}}(k+1) = T_i^{\text{in}}(k) + \frac{\Delta t}{2D_i^d} \left(\frac{T^{\text{O}}(k+1) - T_i^{\text{in}}(k+1)}{R_i} - \eta_i^b Q_i^a(k+1) + \frac{T^{\text{O}}(k) - T_i^{\text{in}}(k)}{R_i} - \eta_i^b Q_i^a(k) \right) \quad (18)$$

其紧凑形式可写成如下形式。

$$g_d(\mathbf{u}_d, \mathbf{x}_d, \mathbf{y}_d) = 0 \quad (19)$$

$$h_d(\mathbf{u}_d) \leq 0 \quad (20)$$

$$g_c(\mathbf{u}_c, \mathbf{x}_c) = 0 \quad (21)$$

$$h_c(\mathbf{x}_c) \leq 0 \quad (22)$$

$$g_g(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_g, \mathbf{y}_d) = 0 \quad (23)$$

式中: $\mathbf{u}_d$ 和 $\mathbf{u}_c$ 分别为区域供冷系统和火电机组的控制变量; $\mathbf{x}_d$ 、 $\mathbf{x}_c$ 和 $\mathbf{x}_g$ 分别为区域供冷系统、火电机组、电网频率的状态变量; $\mathbf{y}_d$ 为区域供冷系统的代数变量。具体含义如下。

$$\mathbf{u}_d = [T_i^{\text{in,set}}(k)]^T, \forall k \in T, \forall i \in I_N \quad (24)$$

$$\mathbf{u}_c = [P^c(k)]^T, \forall k \in T \quad (25)$$

$$\mathbf{x}_d = [T_i^{\text{in}}(k), M_i^{1,1}(k), M_i^{1,2}(k)]^T, \forall k \in T, \forall i \in I_N \quad (26)$$

$$\mathbf{x}_c = [P_l^m(k), P_l^g(k)]^T, \forall k \in T, \forall l \in L_T \quad (27)$$

$$\mathbf{x}_g = [f(k), X(k)]^T, \forall k \in T \quad (28)$$

$$\mathbf{y}_d = [T_i^{\text{b,s,set}}(k), T_i^{\text{b,s}}(k), P^{\text{ch}}(k), Q^{\text{ch}}(k), m^{\text{ch}}(k), Q_i^a(k), m_i^a(k)]^T, \forall k \in T, \forall i \in I_N \quad (29)$$

式(19)表示与区域供冷系统相关等式(包括式(1)~(10))的离散化方程; 式(20)表示与区域供冷系统相关不等式(式(11))的离散化方程; 式(21)表示与火电机组相关等式(包括式(13)~(14))的离散化方程; 式(22)表示与火电机组相关不等式(式(15))的离散化方程; 式(23)表示与电网频率相关等式(包括式(12)和(16))的离散化方程。

3 基于 MPC 的区域供冷系统和火电机组联合调频模型

由于各建筑物是互不影响的, 因此它们的初始条件各不相同, 也具有不同的冷负荷需求。如果各建筑物均有相同的建筑物设定温度值, 那么

可能会出现某些建筑物偏离人体舒适度过多的情况。因此,要优化各建筑物设定温度值并考虑区域供冷系统和火电机组间调频任务的分配,本文提出一种基于模型预测控制的二次频率控制方法。假设调频控制周期为 T_c , 预测时域 T 包括 N_c 个控制周期, 控制时域 $T_i = T_c \times N_c$, 将每个控制周期等分为 M 个子区间, 每个子区间长度为 Δt 。以最小化建筑物温度与人体舒适温度偏差、火电机组调频功率指令和频率偏差为目标, 求取建筑物温度设定值和火电机组调频功率指令。图 4 给出了基于 MPC 的区域供冷系统和火电机组联合调频模型。图中, N_L 和 N_I 分别代表火电机组和建筑物的数量。图 4 最左侧框图代表模型预测控制器, 中间上半部分框图表示 2.2 节中火电机组模型的传递函数, 中间下半部分框图表示 2.1 节中区域供冷系统模型的传递函数, 最右侧框图表示系统频率响应动态过程的传递函数。模型预测控制器根据 Δf 给出火电机组和区域供冷系统的调频指令, 从而调整火电机组和区域供冷系统的功率。联合调频模型具体描述如下。

$$\min_{T_i^{\text{in, set}}(k), P_c(k)} \mu_1 \sum_{k=1}^{M \times N_c} \sum_{i=1}^{N_L} (T_i^{\text{in}}(k) - T_i^c)^2 + \sum_{k=1}^{M \times N_c} [\mu_2 (P_c(k))^2 + \mu_3 (f(k) - f_0)^2 + \mu_4 X_1^2(k)] \quad (30)$$

s. t. 式(19)–(23)

式中: $\mu_1 \sim \mu_4$ 分别为各项的权重系数; T_i^c 为人体舒适的建筑物温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

联合调频模型式(30)是一个二次规划模型, 在 GAMS 42.3.0 环境中调用 Gurobi 求解器进行求解。输出结果为控制时域内的所有控制指令: $[T_i^{\text{in, set}}(k_0), P_c(k_0), T_i^{\text{in, set}}(k_0 + 1), P_c(k_0 + 1), \dots, T_i^{\text{in, set}}(k_0 + N_c - 1), P_c(k_0 + N_c - 1)]$ 。取 $T_i^{\text{in, set}}(k_0)$ 和 $P_c(k_0)$ 作为当前时刻 k_0 的控制指令, 更新系统状态, 再进入下一控制周期进行求解。

4 算例分析

4.1 测试系统介绍

本文基于新英格兰 10 机 39 节点系统^[26]构造算例, 在 26 号节点接入一个区域供冷系统, 网络拓扑结构如图 5 所示。系统等值惯性时间常数 H 为

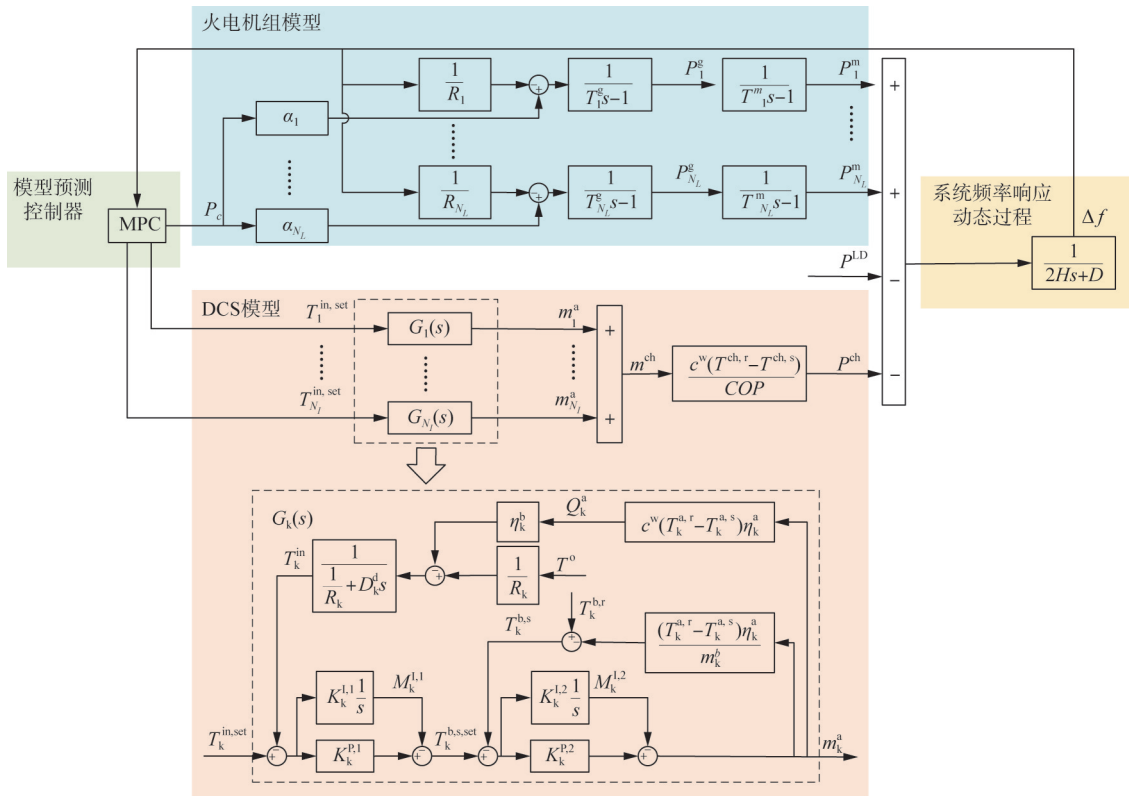


图 4 基于 MPC 的区域供冷系统和火电机组联合调频模型

Fig. 4 Combined frequency regulation model of a district cooling system and thermal units based on MPC

78.27, 阻尼常数 D 为 10。该区域供冷系统共包括 12 栋建筑, 有 160 MW 的冷负荷需求。各建筑参数如表 1 所示^[12]。算例仿真总时长为 300 s, 控制周期 $T_c=2$ s, 预测时域 $T=6$ s, 控制时域 $T_1=6$ s, 子区间 $\Delta t=0.05$ s。

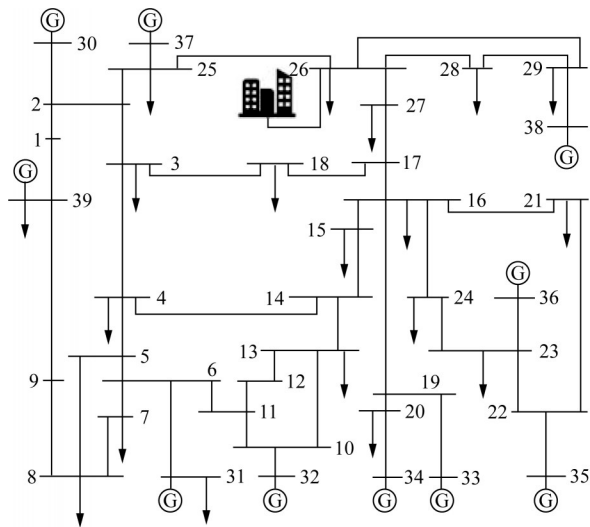


图5 含区域供冷系统的10机39节点系统拓扑结构

Fig. 5 Topology structure of 10-unit 39-bus system with a district cooling system

4.2 区域供冷系统参与调频的可行性

为验证区域供冷系统参与调频的可行性, 本节先不考虑火电参与调频。测试所用的负荷扰动为阶跃负荷, 即: 负荷在 0~50 s 时保持不变; 在第 50 s 时负荷突增 20 MW, 此后一直维持不变。区域供冷系统的功率变化如图 6 所示。

由图 6 可知, 在第 165 s 时区域供冷系统功率变化为 -20 MW, 并达到新的稳态。在本文所提控制策略下, 区域供冷系统从接受控制指令至达到新的稳态所需时间为 115 s。

表 1 区域供冷系统参数

Tab. 1 Parameters of a district cooling system

参数	数值
能效比 COP 值	5
热交换效率 η_i^a, η_i^b	0.9
比热容 c^w	4.2
建筑物的热惯性 D_i^d	10^6
建筑物的热阻 R_i	0.001
人体舒适温度 $T_i^c/^{\circ}\text{C}$	23
室外温度 $T_i^0/^{\circ}\text{C}$	35

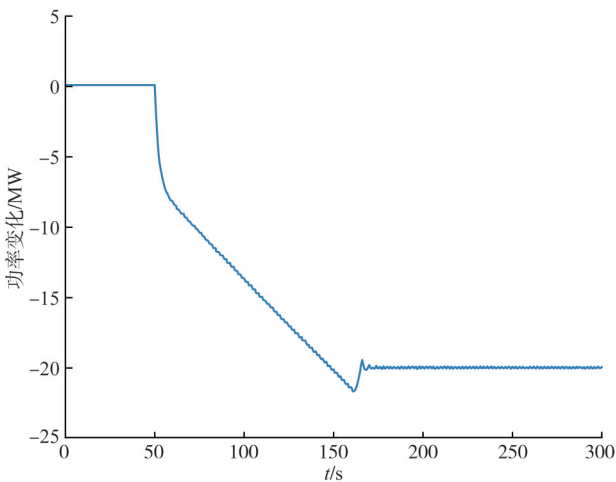


图6 区域供冷系统功率变化

Fig. 6 Power change of a district cooling system

4.3 区域供冷系统参与调频的优越性

为验证本文所提调频方法对电网频率的改善, 本节采用和 4.2 节相同的负荷扰动, 考虑了 3 种调频方式: 1) 基于 MPC 的区域供冷系统与火电联合调频; 2) 基于 MPC 的仅有火电参与调频; 3) 基于 PI 控制的区域供冷系统与火电联合调频。这 3 种方式的调频效果如图 7 所示。

由图 7 可知, 基于 MPC 的区域供冷系统与火电机组联合调频系统具有最好的表现效果。在负荷突增时基于 MPC 的区域供冷系统与火电机组联合调频系统频率最低为 49.75 Hz, 在 31.15 s 后系统可恢复额定频率。仅有火电参与调频的系统频率最低, 另两种调频方式的频率最低点相近。基于 PI 控制的区域供冷系统与火电机组联合调频系统超调量最大, 且在系统恢复稳定前的振荡过程最长。在这 3 种调频方式中基于 MPC 的区域供冷系统与火电机组联合调频系统频率跌落得最少, 超调量最小, 系统恢复额定频率的速度最快。

4.4 负荷连续波动场景

本节展示了在面对负荷连续波动时区域供冷系统和火电机组联合调频的结果。负荷波动情况如图 8 所示, 系统频率变化如图 9 所示, 区域供冷系统和火电机组功率变化情况如图 10 所示。

从图 9—10 可以看出, 由于区域供冷系统对用户舒适度有所影响, 调频任务仍主要由火电机组承担, 但在负荷突变开始的一段时间内区域供冷系统功率也有变化, 能够分担一部分火电机组的调频任务。以 20~40 s 为例, 此时负荷突减 7 MW。区域供

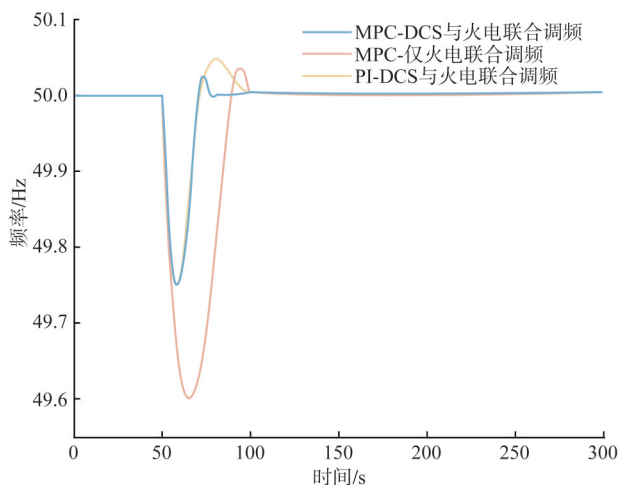


图 7 3种调频方式频率变化

Fig. 7 Frequency change of three frequency regulation modes

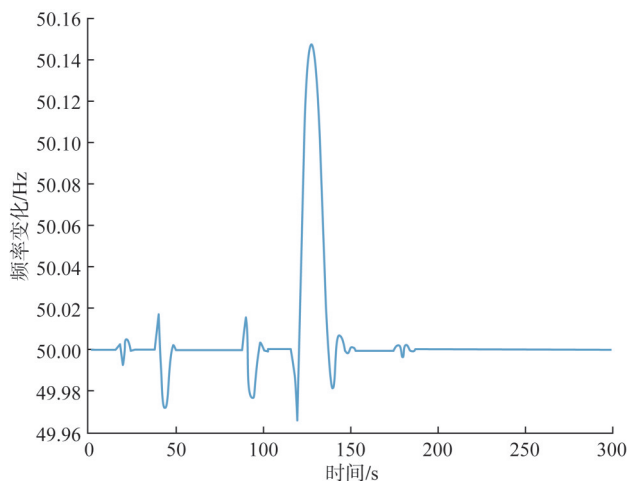


图 9 系统频率变化情况

Fig. 9 Change of system frequencies

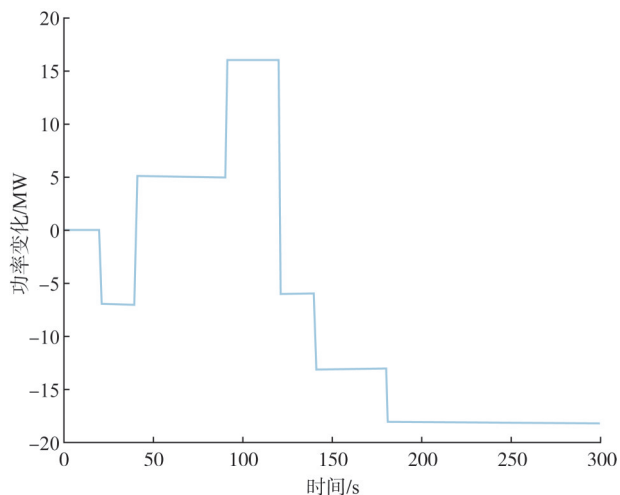


图 8 负荷连续波动情况

Fig. 8 Continuous load variation

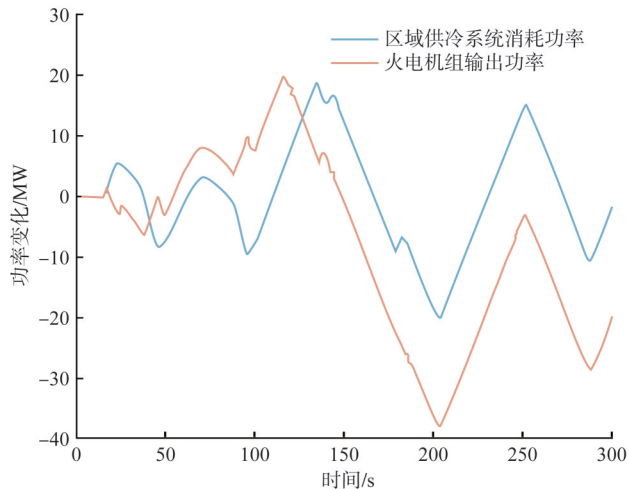


图 10 区域供冷系统和火电机组功率变化情况

Fig. 10 Power change of a district cooling system and thermal units

冷系统增加的功率在第 24 s 达到最大, 为 5.217 MW, 此后随着火电机组出力减小区域供冷系统的功率也逐渐减小。区域供冷系统在调频过程中起到减小系统频率波动、帮助系统快速恢复额定频率的作用, 负荷波动最终仍由火电机组负责平抑。

图 11 给出了各建筑物中温度的变化情况。在 0~20 s 时负荷波动为 0, 但各初始温度不同的建筑物调整了制冷量, 从而将温度调整为人体的舒适温度。由于各向上和向下调节制冷量相互抵消, 表现为整个区域供冷系统的制冷量变化不大, 因此区域供冷系统总体消耗的电功率变化也不大。在 20~40 s 时系统负荷突减 7 MW, 需要区域供冷系统增加功耗, 表现为建筑物温度总体处于下降趋势。第 120 s 以后负荷不断减少, 各建筑物的温度均持续

下降, 在第 170 s 达到最大偏差, 此时偏离用户舒适温度为 0.17 °C。总体而言, 建筑物温度仍是在人体舒适温度附近变化, 表明区域供冷系统参与电网调频不会对用户舒适度造成太大影响。

5 结论

本文提出了一种基于模型预测控制的区域供冷系统参与电力系统二次调频的控制策略, 优化分配区域供冷系统和火电机组的调频任务, 得出以下结论。

1) 本文通过给出建筑物温度设定值, 再通过 PI 控制器改变区域供冷系统的冷冻水流量, 从而达到控制区域供冷系统能耗的目的。通过仿真验证, 采

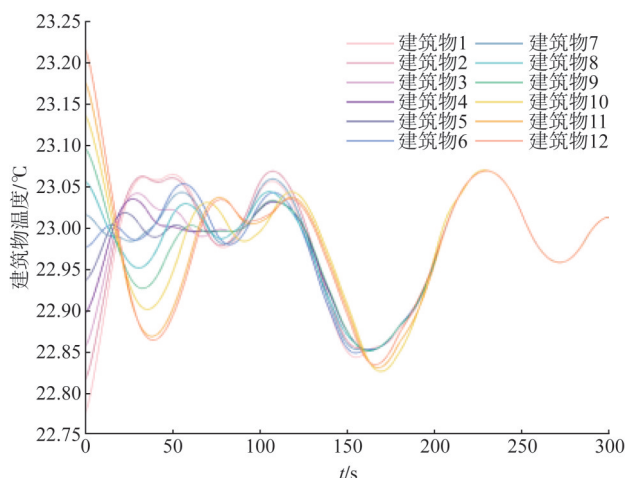


图 11 区域供冷系统中各建筑物温度的变化

Fig. 11 Temperature variations in buildings in a district cooling system

用所提控制策略区域供冷系统可在 115 s 内达到目标功率值。

2) 相比于仅有火电机组参与调频, 由区域供冷系统与火电机组共同提供调频服务的系统频率跌落得更少, 且系统恢复额定频率的速度更快。

3) 除了考虑调频效果, 本文还进一步分析考虑了参与调频对用户舒适度的影响, 参与调频后偏离用户舒适温度最大为 0.17°C 。由此表明区域供冷系统参与电网调频不会对用户舒适度造成太大影响。

本文的算例在新英格兰 10 机 39 节点系统上进行, 算例规模较小, 后续工作考虑在实际的省级系统上进行算例验证。此外, 部分区域供冷系统项目配置了储能, 储能与区域供冷系统联合调频能够改善系统频率, 并提高区域供冷系统的经济性。本文调节区域供冷系统功率采用的手段是调节房间温度设定值, 后续研究中可考虑通过其他控制手段对功率进行调节。

参考文献

[1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20–27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20–27.

[2] 刘翔宇, 李晓明, 朱介北, 等. 新型电力系统的频率响应模型综述及展望[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 38–47.
LIU Xiangyu, LI Xiaoming, ZHU Jiebei, et al. Review and prospect on frequency response models of new power system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 38

– 47.

[3] 赵熙临, 李品, 付波. 基于多目标优化的风储协同一次调频控制策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 68–76.
ZHAO Xilin, LI Pin, FU Bo. Primary frequency regulation control strategy with wind-storage cooperation based on multi-objective optimization[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 68–76.

[4] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2–11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2–11.

[5] 胡江溢, 郑涛, 金龙, 等. 计及用户决策不确定性与调频备用需求的空调负荷聚合策略[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3534–3542.
HU Jiangyi, ZHENG Tao, JIN Yulong, et al. An aggregation strategy of air conditioning loads considering uncertainty of customer behavior and frequency regulation demand[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3534–3542.

[6] 张严, 楚晓丽, 刘永强. 区域供冷系统的冷量传递控制与末端冷量调节[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 26–33.
ZHANG Yan, CHU Xiaoli, LIU Yongqiang. Cold transmitting control and terminal cold adjusting of district cooling system[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(10): 26–33.

[7] 闫军威. 区域供冷系统节能优化运行与控制方法研究及系统实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[8] ELISA G, LUCA B, ANTONIO G, et al. Optimal configuration of power-to-cool technology in district cooling systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1612–1622.

[9] HE J, GUO Z, LI Y. Multi-objective optimization of district cooling systems considering cooling load characteristics[J]. Energy Conversion and Management, 2023(281): 116823.1–116823.10.

[10] YAN B, CHEN G, ZHANG H, et al. Strategical district cooling system operation with accurate spatiotemporal consumption modeling[J]. Energy and Buildings, 2021(247): 111165.1–111165.12.

[11] SAM J, Dongsu K, Heejin C, et al. Real time optimal control of district cooling system with thermal energy storage using neural networks[J]. Applied Energy, 2019(238): 466–480.

[12] YU P, ZHANG H, SONG Y, et al. Frequency regulation capacity offering of district cooling system: an intrinsic-motivated reinforcement learning method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2762–2773.

[13] YU P, HUI H, ZHANG H, et al. District cooling system control for providing operating reserve based on safe deep reinforcement learning[J]. Applied Energy, 2023(347): 121396.1–121396.9.

[14] YADAV M K, VERMA A, PANIGRAHI B K. Frequency regulation support from district cooling system and V2G facility in cluster of buildings[C]// 2023 11th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), June 4–7, 2023, Paris, France. New York: IEEE, 2023: 289–293.

[15] YU P, ZHANG H, SONG Y. Equivalent system model of district cooling system in frequency domain to provide primary frequency regulation[J/OL]. CSEE Journal of Power and

- Energy Systems, [2023-12-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10246135>.
- [16] WANG H, WANG S, SHAN K. Experimental study on the dynamics, quality and impacts of using variable-speed pumps in buildings for frequency regulation of smart power grids[J]. Energy, 2020(199):117406.1-117406.8.
- [17] XING L, VERONICA A, ZHENG O. What are the impacts on the HVAC system when it provides frequency regulation? - A comprehensive case study with a multi-zone variable air volume (VAV) system[J]. Energy and Buildings, 2021(243):110995.1-110995.11.
- [18] WANG H, WANG S. A hierarchical optimal control strategy for continuous demand response of building HVAC systems to provide frequency regulation service to smart power grids[J]. Energy, 2021(230):120741.1-120741.8.
- [19] WANG H, DING Z, TANG R, et al. A machine learning-based control strategy for improved performance of HVAC systems in providing large capacity of frequency regulation service[J]. Applied Energy, 2022(326):119962.1-119962.9.
- [20] ZHAO P, HENZE G P, PLAMP S, et al. Evaluation of commercial building HVAC systems as frequency regulation providers[J]. Energy and Buildings, 2013(67):225-235.
- [21] 胡晓青. 空调负荷参与电力系统需求响应的建模及控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [22] GUPTA S K, GHOSE T, CHATTERJEE K. Coordinated control of incentive-based demand response program and BESS for frequency regulation in low inertia isolated grid[J]. Electric Power Systems Research, 2022(209):108037.1-108037.7.
- [23] 李漠发, 张志文, 胡斯佳, 等. 基于 MVO 算法与改进目标函数的电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6):1-14.
- LI Mofa, ZHANG Zhiwen, HU Sijia, et al. Load frequency control of power systems based on an MVO algorithm and improved objective function[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6):1-14.
- [24] 李建华, 曹路, 杨仁炘, 等. 华东沿海风电场群电网主动频率支撑策略[J]. 中国电力, 2023, 56(11):49-58, 112.
- LI Jianhua, CAO Lu, YANG Renxin, et al. An active frequency support strategy for costal wind farms in east China[J]. Electric Power, 2023, 56(11):49-58, 112.
- [25] 林建熙, 刘必成, 肖晃庆, 等. 大规模海上风电接入的受端电网频率特性[J]. 广东电力, 2023, 36(3):23-31.
- LIN Jianxi, LIU Bicheng, XIAO Huangqing, et al. Frequency characteristics of receiving end power grid for large-scale offshore wind power access[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(3):23-31.
- [26] 刘明波, 林舜江, 谢敏. 电力系统电压稳定分析与控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

收稿日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2024-03-19

作者简介:

毛田(1989), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力市场、需求响应、虚拟电厂;

周保荣(1974), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、规划设计;

劳子卿(2000), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度与控制, laoziqinglqz@qq.com。

广 告

中国南方电网电网仿真重点实验室……………封二

南网知识星球……………封三

直流输电技术全国重点实验室……………A1

南方电网电力科技股份有限公司……………A2