

考虑不同空调负荷特性的微网双层优化调度

陈健¹, 张维桐¹, 张逸成², 鲍冠南³, 李佳潞⁴

- (1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省 济南市 250061;
2. 南洋理工大学 电气与电子工程学院, 新加坡 639798;
3. 国网山东电力调度控制中心, 山东省 济南市 250001;
4. 天津市第一中学, 天津市 和平区 300051)

Bi-Level Optimal Dispatch of Microgrid Considering Different Air-Conditioning Load Characteristics

CHEN Jian¹, ZHANG Weitong¹, ZHANG Yicheng², BAO Guannan³, LI Jialu⁴

- (1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of the Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, Shandong Province, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798;
3. State Grid Shandong Electric Power Dispatching & Control Center, Jinan 250001, Shandong Province, China;
4. Tianjin No.1 High School, Heping District, Tianjin 300051, China)

ABSTRACT: In view of the fact that different types of air conditioning loads have different scheduling potential, a multi-time scale optimal scheduling strategy for microgrid considering different air-conditioning load characteristics is proposed. Based on the different air-conditioning load characteristics, this strategy proposes a bi-level optimal scheduling model considering day-ahead scheduling and real-time scheduling. The day-ahead scheduling layer is used to minimize system operating costs considering load transfer characteristics of ice-storage air-conditioning and load reduction characteristics of decentralized air-conditioning. The real-time scheduling layer is used to minimize power fluctuation of tie line and battery considering chiller adjustment characteristics of ice-storage air-conditioning and load adjustment characteristics of decentralized air-conditioning. Finally, validity of the proposed model is verified with case study.

KEY WORDS: air-conditioning load; ice-storage air-conditioning; microgrid; optimal scheduling

摘要: 针对不同类型的空调负荷具有不同调度潜力的特点, 提出一种考虑不同空调负荷特性的多尺度微网优化调度策略。该策略在考虑不同空调负荷特性的基础上, 提出了计及日前调度和实时调整的双层优化调度模型。其中日前调度层

考虑了冰蓄冷中央空调负荷转移特性和分散空调负荷的削减特性, 用以最小化系统运行成本; 实时调整层考虑了冰蓄冷中央空调的制冷机功率调整特性和分散空调负荷调整特性, 用以最小化电网联络线和蓄电池功率波动。最后通过算例分析验证了所提出模型的有效性和正确性。

关键词: 空调负荷; 冰蓄冷空调; 微网; 优化调度

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2040

0 引言

随着经济发展, 我国各个地区空调负荷大幅上升, 城市夏季空调负荷可以占高峰负荷的30%~40%, 并且仍呈逐年增长趋势^[1-2], 这增加了系统的调峰难度和运行成本, 给电力系统的安全、经济运行带来了极大的挑战。

针对空调负荷快速增长引起的电力系统经济、稳定运行问题, 根据空调负荷的需求响应特性^[3-4], 通过合理的调控方法快速响应电网侧电力调度, 可以有效缓解电力供需矛盾并降低系统调峰难度和运行成本。由于不同特性的空调负荷, 其控制方法有很大区别, 故将空调负荷分为分散空调负荷和集中空调负荷。针对空调负荷参与微网调度已有一些研究工作: 对于集中空调负荷, 文献[5]提出了一种包含冰蓄冷中央空调的微网日前优化调度模型, 利用冰蓄冷空调的移峰特性降低了系统运行成本; 文献[6-7]提出了一种控制蓄冰槽释冷量和冷负荷成比例的控制方法, 在削减负荷的同时保证冰量被充

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507094); 山东大学基本科研业务费资助项目(2015GN002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51507094); Basic Scientific Research Fund Project of Shandong University (2015GN002).

分利用。然而集中冰蓄冷空调负荷的调度并不局限于日前调度层,在实时调度层中集中冰蓄冷空调也可以发挥其调度潜力。对于分散空调负荷,文献[8]提出了分散空调负荷的周期性暂停控制策略,根据楼宇的储热特性控制空调启停使室内温度在一定范围内波动,减小了系统运行成本,并通过对空调负荷的控制减小了系统的功率波动;文献[9]提出了一种分散空调负荷平抑功率波动的控制策略,通过对空调负荷的聚合和削减达到平抑功率波动的目的。但是在实时调整层中,仅仅对分散空调负荷进行削减,当负荷水平下降或者电源出力上升时,通过分散空调负荷控制不能起到平抑系统功率波动的作用。此外,现有研究大多单独针对分散空调负荷(以居民负荷为主)或集中空调负荷(以冰蓄冷空调负荷为主)参与微网调度的研究,综合考虑分散空调负荷和集中空调负荷的不同特性和协调控制的研究还较少。

集中空调负荷和分散空调负荷在不同时段的调度潜力是不同的。集中空调负荷一般集中在白天,夜间的负荷很低^[10],因此集中空调负荷在白天的调度潜力高,夜间调度潜力很低;而分散空调负荷的高峰负荷一般出现在晚间 20:00—23:00,低谷时段出现在凌晨^[11],因此分散空调负荷在晚高峰时段的调度潜力高,凌晨的低谷时段较低。由于两种空调负荷在不同时段的调度潜力不同,在系统调度中综合考虑两种负荷能够起到互补作用,可进一步降低系统运行成本和功率波动。

本文以包含光伏、蓄电池储能系统、一般电负荷和空调负荷的微网为例,提出了一种考虑不同空调负荷特性的多尺度微网优化调度策略。日前调度层中,考虑了集中冰蓄冷空调负荷转移特性和分散空调负荷的削减特性,根据负荷和光伏出力对微网系统进行经济调度;在实时调整层中,提出了集中冰蓄冷空调的实时功率调整约束和分散空调负荷的调整约束,以平抑可再生能源和负荷不确定性带来的电网联络线和蓄电池功率波动,使其尽量遵循日前调度计划。最后通过算例分析验证了所提模型的有效性和正确性。

1 微网系统模型

微网系统由光伏、蓄电池储能系统和负荷(包括一般电负荷、分散空调负荷和冰蓄冷集中空调负荷)组成,如图1所示。

1.1 冰蓄冷空调模型

冰蓄冷空调系统一般由制冷机组、冷却塔、蓄

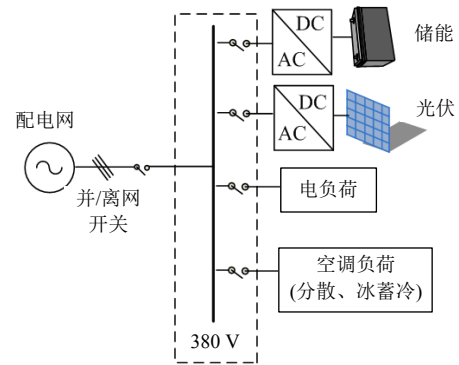


图1 微网示意图

Fig. 1 The diagram of a microgrid

冷槽、水泵和其他辅助设备组成,如图2所示,主要利用冰作为储能介质,使大型空调机组在夜间用电低谷期储存能量,并在电网的供电高峰期供应冷负荷,从而降低楼宇夏季用电高峰时的负荷峰值,使电网移峰运行。

冰蓄冷空调主要有制冷、制冰和融冰3个工作模式,白天集中负荷高,冰蓄冷空调工作在制冷模式和融冰模式以提供冷负荷,夜间集中负荷很低,冰蓄冷空调只工作在制冰模式。

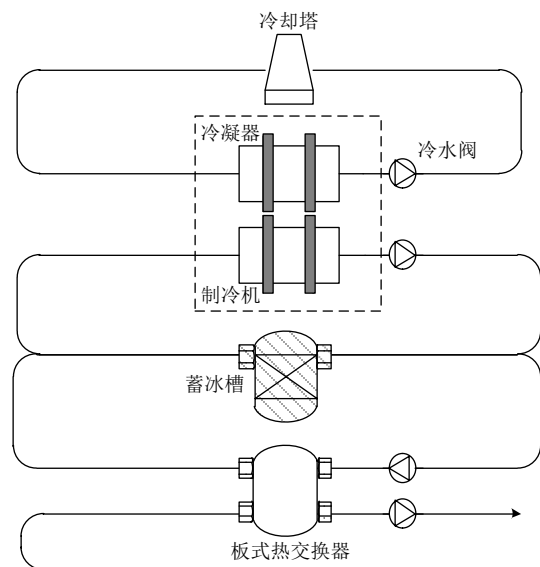


图2 冰蓄冷空调示意图

Fig. 2 The ice-storage conditioning

1.1.1 冰蓄冷空调工作模式

1) 制冷模式。

在该模式下制冷机工作以满足冷负荷,同时为了提高制冷效率,制冷机应避免在低负荷率下工作:

$$I_a(t)Q_{amin} \leq Q_a(t) \leq I_a(t)Q_{amax} \quad (1)$$

式中: $Q_a(t)$ 是 t 时刻制冷机在制冷模式下产生的制冷功率; $I_a(t)$ 为 t 时刻制冷机制冷模式的启停变量(制冷模式开启时取1,关闭时取0); Q_{amin} 和 Q_{amax} 分别为制冷机最小、最大制冷功率。

此时制冷模式下制冷机消耗的电功率 $P_a(t)$:

$$P_a(t) = \frac{Q_a(t)}{a_1 Q_a(t) + a_2} \quad (2)$$

式中 a_1 、 a_2 是根据空调参数得到的拟合因子。在夜间低负荷时段制冷机的制冷模式不启动

$$I_a(t) = 0, \quad t \in [t_0, t_1] \quad (3)$$

式中: t_0 、 t_1 分别代表夜间低负荷时段的开始和结束时刻。

2) 制冰模式。

在制冰模式下, 制冷机运行在额定功率附近, 保证制冰效率:

$$b I_c(t) Q_{\max} \leq Q_c(t) \leq I_c(t) Q_{\max} \quad (4)$$

式中: $Q_c(t)$ 是 t 时刻制冷机在制冰模式下产生的制冷功率; b 为制冰模式下最小制冷功率与最大功率之比; $I_c(t)$ 为 t 时刻制冷机制冰模式的启停变量(制冰模式开启时取 1, 关闭时取 0)。

制冰模式下制冷机消耗的电功率:

$$P_c(t) = \frac{Q_c(t)}{a_1 Q_c(t) + a_2} \quad (5)$$

制冰模式在非低负荷时段不启动且需要在一段时间内连续的运行, 即在负荷低谷期中制冰模式分别开启($I_c(t)$ 由 0 变为 1)和关闭($I_c(t)$ 由 1 变为 0)一次:

$$\begin{cases} \sum_{t=t_0}^{t_1} |I_c(t) - I_c(t-1)| = 2 \\ I_c(t) = 0, t \notin [t_0, t_1] \end{cases} \quad (6)$$

3) 融冰模式。

蓄冰槽融冰制冷以满足冷负荷, 该模式在非低负荷时段运行, 而且此时消耗的电功率恒定。

$$I_d(t) = 0, \quad t \in [t_0, t_1] \quad (7)$$

$$0 \leq Q_d(t) \leq I_d(t) Q_{\max} \quad (8)$$

式中: $Q_d(t)$ 是 t 时刻融冰模式产生的冷功率; $I_d(t)$ 为 t 时刻融冰模式的启停变量(融冰模式开启时取 1, 关闭时取 0)。

1.1.2 冰蓄冷空调工作模式

蓄冰槽中储存的冷量 S :

$$S(t) = (1 - \eta_1) S(t-1) + \eta_2 Q_c(t) - Q_d(t) \quad (9)$$

式中: η_1 为储冰的耗散系数; η_2 为制冰系数。

1.1.3 冷却塔

冷却塔的功率消耗主要由风扇电动机计算而来, 根据 Blast 经验模型^[12], 冷却塔中的风扇功率 P_{twr} 与冷却塔负荷成比例关系:

$$P_{\text{twr}} = l(Q_a + Q_d) \quad (10)$$

式中: l 为冷却塔功率系数。

1.2 分散空调模型

1.2.1 空调热参数模型

针对家庭用户和小型工商业用户的分散式空调进行聚合控制研究, 考虑分散式空调负荷基本动态过程, 可得到表征空调功率与温度变化的一阶状态模型如下。当空调开启和关断时有:

$$T_{\text{in}}^{t+1} = T_{\text{out}}^{t+1} - (T_{\text{out}}^{t+1} - T_{\text{in}}^t) e^{-\frac{\Delta t}{R_f C}} \quad (11)$$

$$T_{\text{in}}^{t+1} = T_{\text{out}}^{t+1} - 1000\eta PR_f - (T_{\text{out}}^{t+1} - 1000\eta PR_f - T_{\text{in}}^t) e^{-\frac{\Delta t}{R_f C}} \quad (12)$$

式中: T_{in}^t 和 T_{in}^{t+1} 分别是 t 时刻和 $t+1$ 时刻的室内温度; T_{out}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻的室外温度; C 为房间的等效比热容; R_f 为房间的等效热阻; P 为空调的工作功率; η 为空调能效比; Δt 为仿真步长。

1.2.2 空调周期性暂停控制模型

根据人体舒适度理论, 适宜的室内温度是一个变化的温度带。根据房间的热迟滞效应, 当室温达到温度上限时关断空调, 使室内温度下降, 直到室温降低至温度下限再开启空调, 保证室内温度在一定的范围内波动, 对外的表现则是空调功率的降低。

根据空调热参数模型, 进一步可得到室外温度恒定时空调可关断时间 τ_0 和可开启时间 τ_1 :

$$\tau_0 = R_f C \ln \left(\frac{T_{\min} - T_{\text{out}}}{T_{\max} - T_{\text{out}}} \right) \quad (13)$$

$$\tau_1 = R_f C \ln \left(\frac{1000\eta PR_f + T_{\max} - T_{\text{out}}}{1000\eta PR_f + T_{\min} - T_{\text{out}}} \right) \quad (14)$$

式中: T_{\min} 、 T_{\max} 分别为室内温度的上下限; T_{out} 为室外温度。进一步结合温度波动区间对等效热参数模型进行线性化^[13], 如图 3 所示, 则得某时刻 p 台空调的可调度容量 C_T ^[8] 为:

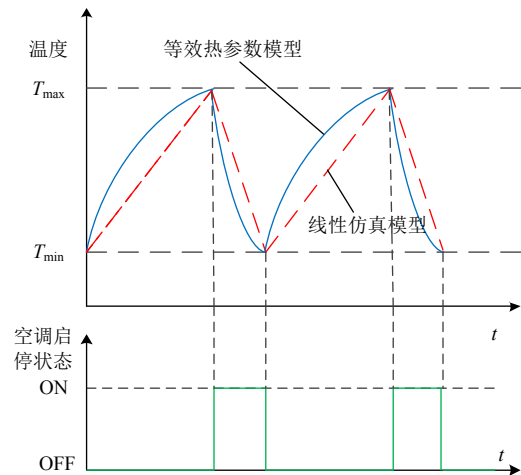


图 3 等效热参数模型和线性仿真模型对比图

Fig. 3 The equivalent thermal parameter model and linear simulation model

$$C_T = \frac{\tau_0}{\tau_0 + \tau_1} \sum_{i=1}^p P_i = a \sum_{i=1}^p P_i \quad (15)$$

式中： $i=1, 2, 3, \dots, p$ ； τ_0 为空调在控制周期内的可关断时间； τ_1 为空调的可开启时间； P_i 为第 i 台空调的额定功率； a 为空调负荷的削减系数。

1.3 蓄电池储能系统

蓄电池储能系统要满足以下的约束：

$$E(t+1) = E(t) + f_{ch}(t)P_{ch}(t)\Delta t\eta_3 - f_{dis}(t)P_{dis}(t)\Delta t / \eta_4 \quad (16)$$

$$0 \leq P_{ch}(t) \leq f_{ch}(t)P_{ch\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq f_{dis}(t)P_{dis\max} \quad (18)$$

$$f_{ch}(t) + f_{dis}(t) \leq 1 \quad (19)$$

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (20)$$

式中： $E(t+1)$ 、 $E(t)$ 分别为 t 和 $t+1$ 时刻电池的电量； $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 分别为 t 时刻电池充电和放电功率； $f_{ch}(t)$ 、 $f_{dis}(t)$ 分别为电池充电和放电标志位； η_3 、 η_4 为电池充电效率和放电效率； E_{\max} 、 E_{\min} 为电池电

量的上下限。蓄电池的寿命损耗成本使用蓄电池放电寿命模型计算得到^[14]。

1.4 光伏

$$P_{PV} = P_{STC} G_{AC} \frac{[1 + k(T_c - T_r)]}{G_{STC}} \quad (21)$$

式中： P_{PV} 为光伏出力功率； G_{AC} 为光照强度； P_{STC} 为标准条件下的最大测试功率； G_{STC} 为测试标准下的光照强度； k 为功率温度系数； T_c 为电池板工作温度； T_r 为参考温度。

2 微网双层优化调度策略

本文以 24 h 作为一个调度周期，基于未来 24 h 预测数据调度层进行长周期经济性优化调度；基于分钟级(每 10 分钟)预测数据，调整层在 1 h 内进行短周期优化，最小化联络线和储能功率波动；在微网的优化调度中对空调负荷进行控制，发挥空调负荷在经济调度和平抑波动中的作用。

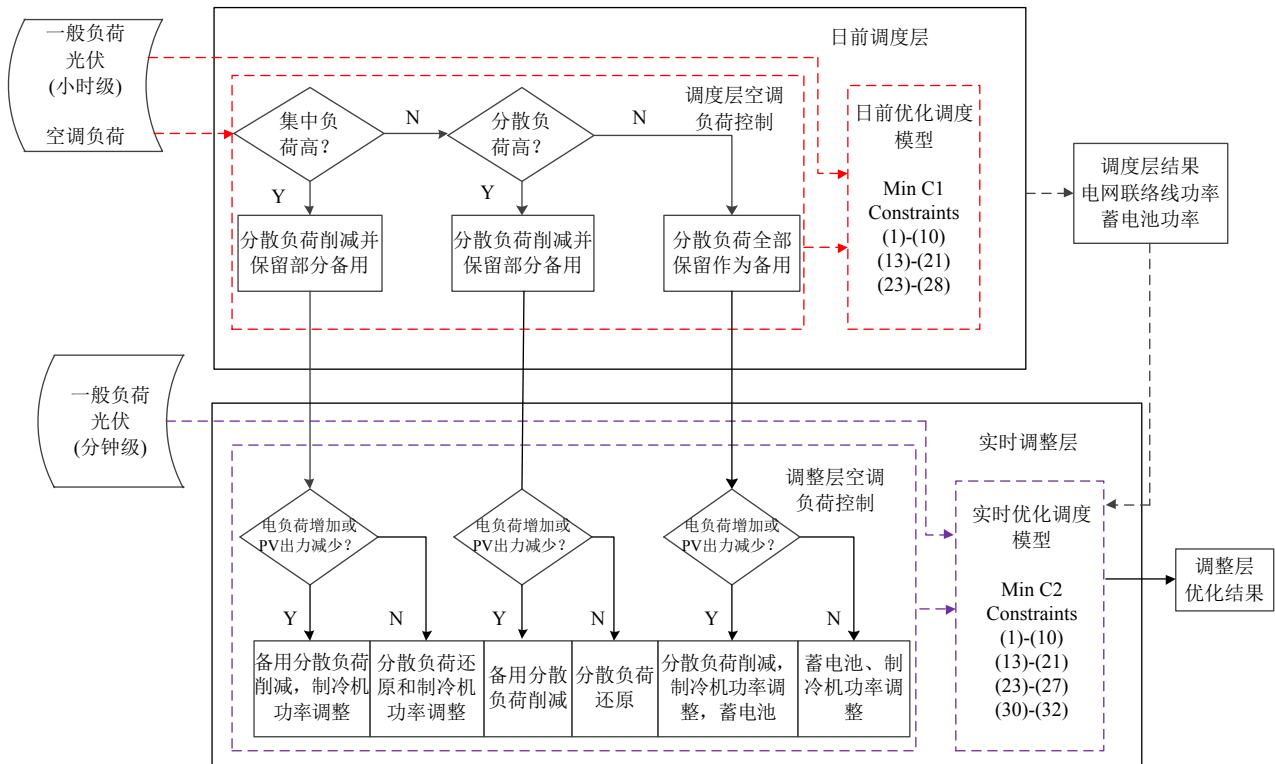


图 4 空调负荷控制策略

Fig. 4 The strategy of controlling air conditioning load

2.1 空调负荷控制策略

空调负荷主要由分散空调负荷和集中空调负荷组成，分散空调负荷一般主要是居民空调房负荷和小型商业负荷，而集中空调负荷主要是大型商业楼宇的空调负荷。根据两种不同特性的负荷提出了以下空调控制策略：

在日前调度层中，根据集中和分散空调负荷水

平的高低对分散空调负荷进行保留不同程度备用的削减，将削减后的分散负荷与电负荷、光伏出力等进行小时级的经济调度；在实时调整层中，对于电负荷和光伏的波动，根据日前调度层中空调负荷的控制选择不同的控制策略，然后根据控制策略、调度层的优化结果进行调整层的优化调度。

以图 5 中的典型空调负荷曲线为例，当时间

8:00—18:00 集中负荷水平很高且分散负荷也较高,此时在调度层中冰蓄冷空调通过制冷和融冰模式共同提供冷负荷,分散负荷在保留部分备用的前提下通过周期性暂停控制削减负荷;在调整层中,由备用的分散负荷削减和制冷机功率调整平抑功率波动。18:00—23:00 集中负荷水平很低且分散负荷处于高峰期,调度层中冰蓄冷空调停止工作,分散负荷同样在保留部分备用的前提下进行削减;在调整层中通过备用分散负荷削减或还原已削减分散负荷进行功率调整。23:00—次日 8:00 集中负荷和分散负荷水平均很低,冰蓄冷空调工作在制冰模式,分散负荷全部作为备用;调整层中通过备用的分散负荷削减、制冷机和蓄电池进行功率调整。

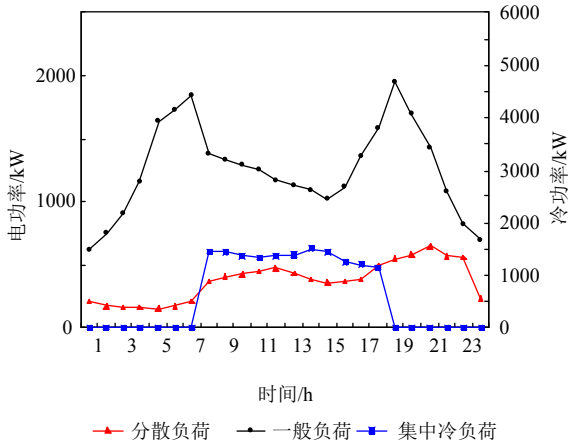


图5 典型空调负荷曲线

Fig. 5 The typical air conditioning load curve

2.2 日前优化调度模型

在日前调度层中,优化目标是最小化日运行成本 C_1 :

$$\min C_1 = \sum_{t=1}^{T_s} (c_{in}(t)P_{in}(t) - c_{out}(t)P_{out}(t)) \quad (22)$$

式中: c_{in} 、 c_{out} 分别为微网从电网购电的电价和向电网售电的电价; P_{in} 、 P_{out} 分别为电网向微网输入的功率和微网向电网输出的功率; T_s 为调度层的调度周期。

微网的小时级经济调度还要满足以下约束:

1) 电功率平衡:

$$P_{PV}(t) + P_{in}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{out}(t) + P_{ch}(t) + P_{de-load}(t) + P_a(t) + P_c(t) + P_d(t) + P_{twr}(t) \quad (23)$$

2) 冷负荷平衡:

$$Q_a(t) + Q_d(t) = Q_{load}(t) \quad (24)$$

3) 运行约束:

$$E(t_0 + T_s) = E(t_0) \quad (25)$$

$$0 \leq P_{in}(t) \leq f_{in}(t)P_{max} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{out}(t) \leq f_{out}(t)P_{max} \quad (27)$$

$$P_{de-load}(t) = a(1 - R_1)P_{de-load0}(t) + R_1P_{de-load0}(t) \quad (28)$$

式中: $P_{de-load}(t)$ 为 t 时刻削减后的分散空调负荷; $P_{de-load0}(t)$ 为 t 时刻削减前的分散空调负荷; R_1 为备用系数; $P_{load}(t)$ 为 t 时刻的电负荷; $f_{in}(t)$ 、 $f_{out}(t)$ 分别为主电网对微网的输入、输出功率的标志位; P_{max} 为联络线功率上限。另外,约束条件还包括上述的各个模型和控制策略的设备自身约束和运行约束。

2.3 实时优化调度模型

调整层是在调度层结果的基础上,根据微网中分布式电源出力和负荷的波动进行一定的调整,最小化微网和主电网、储能之间的联络线功率波动 C_2 。

$$\min C_2 = \sum_{t_s=1}^{t_m} (|P_{in}(t_s) - P_{in}(t)| + |P_{out}(t_s) - P_{out}(t)| + |P_{ch}(t_s) - P_{ch}(t)| + |P_{dis}(t_s) - P_{dis}(t)|) \quad (29)$$

式中: t_m 为调整层调整周期。系统运行所遵循的约束条件除上述调度层约束条件,还应满足:

1) 分散空调负荷调整约束。

根据分布式电源出力和负荷的波动对备用分散空调负荷进行削减或者对调度层中已经削减的分散空调负荷进行还原,以平抑光伏和电负荷波动引起的系统功率波动。将空调按控制方法(削减、未削减)分为 m 和 n 组^[15]。

$$P_{de-load}(t_s) = \sum_{i=1}^n a f_i(t_s) P_i + \sum_{i=1}^m g_i(t_s) P_i / a \quad (30)$$

式中: $f_i(t)$ 为 n 组中每一组的削减变量; $g_i(t)$ 为 m 组中每一组的还原变量; P_i 为每一组分散空调的功率。

2) 冰蓄冷空调制冷机约束。

冰蓄冷空调的制冷机运行在一定的功率范围之内,可以进行调整,同时要避免低负荷率带来的制冷机低效率运行:

$$I_a(t)Q_{a\min} \leq Q_a(t_s) \leq I_a(t)Q_{a\max} \quad (31)$$

$$bI_c(t)Q_{a\max} \leq Q_c(t_s) \leq I_c(t)Q_{a\max} \quad (32)$$

3 算例分析

本文算例系统组成及参数见表 1,电价采用分时电价^[16],如图 6 所示。光伏出力如图 7 所示。冰蓄冷空调的制冷功率和电功率使用分段线性化的方法简化处理^[17]。设定蓄电池的初始投资成本为 2500 元/(kW·h),室内的舒适温度范围为[24℃,27℃],实时调整层中光伏出力和负荷的波动为日前调度层预测基础的 10%。由于上述的问题是一个线性整数规划问题,所以本文通过 YALMIP 进行建模并求解上述的线性整数规划问题。YALMIP 工具箱是一款 MATLAB 用于求解规划问题的工具包,它可以解决线性整数规划、二次规划等各种规划问题。

表 1 设备组成及参数
Tab. 1 Equipment composition and parameters

| 名称 | 参数 | 值 |
|---------|----------------|-----------|
| 光伏 | 额定功率/kW | 2500 |
| 蓄电池储能系统 | 额定容量/(kW·h) | 1000 |
| | 初始容量/(kW·h) | 200 |
| | 容量上限/(kW·h) | 1000 |
| | 容量下限/(kW·h) | 200 |
| | 双向变流器功率/kW | 500 |
| | 充电效率 η_3 | 0.95 |
| | 放电效率 η_4 | 0.95 |
| 冰蓄冷空调 | 蓄冰槽额定容量/(kW·h) | 4500 |
| | 蓄冰槽初始容量/(kW·h) | 0 |
| | 蓄冰槽容量上限/(kW·h) | 4500 |
| | 蓄冰槽容量下限/(kW·h) | 0 |
| | 制冷机额定功率/kW | 1000 |
| | 制冷机功率上限/kW | 1000 |
| | 制冷机功率下限/kW | 800 |
| | 耗散系数 η_1 | 0.02 |
| | 制冰系数 η_2 | 0.67 |
| | 冷却塔功率系数 k | 0.025 |
| | a_1 | 0.001 226 |
| | a_2 | 1.91 |

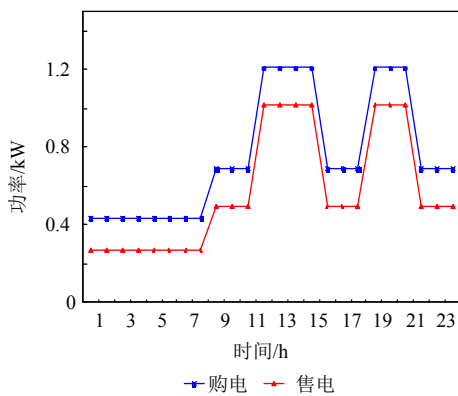


图 6 分时电价
Fig. 6 The time-of-use price

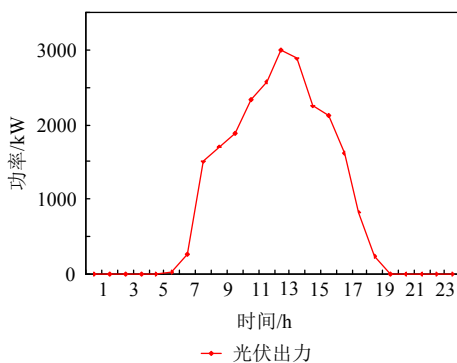


图 7 光伏出力曲线
Fig. 7 The curve of PV output

为了验证所提出的同时考虑两种空调负荷的调度策略的有效性, 针对上述的微网系统分别在 4 种情况下进行仿真:

Case1: 不考虑分散负荷和集中负荷。

算例优化结果如表 2 所示, 其中 ΔP_1 和 ΔP_2 分别为联络线功率和电池功率在调度层和调整层之间的最大功率偏差, ΔP_{1t} 和 ΔP_{2t} 为联络线功率和电池功率的总功率偏差, 成本为日前调度层的系统运行成本。Case4 的成本和功率波动最低, Case2 和 Case3 分别考虑了分散负荷和集中负荷, 成本和功率波动也较低, Case1 的成本和波动最高。

表 2 功率偏差及成本
Tab. 2 Power deviation and cost

| 算例 | $\Delta P_1/\text{kW}$ | $\Delta P_{1t}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | $\Delta P_2/\text{kW}$ | $\Delta P_{2t}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 成本/元 |
|-------|------------------------|--|------------------------|--|--------|
| Case1 | 166 | 894 | 155 | 189 | 14 428 |
| Case2 | 77 | 242 | 62 | 43 | 13 155 |
| Case3 | 138 | 407 | 128 | 154 | 14 307 |
| Case4 | 38 | 71 | 9 | 5 | 12 727 |

Case2: 只考虑分散负荷。

Case3: 只考虑集中负荷。

Case4: 按照上述策略对系统进行控制。

由图 8 可知, 0:00—8:00 时段 Case3 和 Case4 的功率大于 Case1 和 Case2, 但该时段为低价电, 因此增加的成本很小; 在高价电时段 8:00—18:00, Case2、Case3 和 Case4 中向电网的输出功率大于 Case1, 因此该时段前三者的成本均低于后者; 18:00 之后 Case2 和 Case4 中从电网获得的功率小于 Case1, 成本也相对较低。因此 Case4 的成本最低, Case2 和 Case3 次之, Case1 的成本最高。

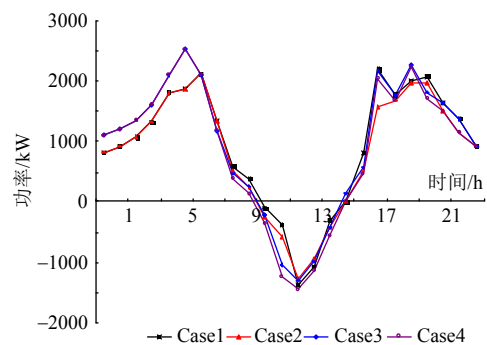


图 8 调度层联络线功率
Fig. 8 The typical air conditioning load curve in day-ahead scheduling layer

调度层分散负荷削减特性和集中负荷的转移特性如由图 9、图 10 所示, 0:00—8:00 时段分散负荷没有削减, 冰蓄冷空调运行于制冰模式, 使 Case3 和 Case4 的负荷增加; 8:00—18:00 时段, 分散负荷削减, 冰蓄冷空调融冰模式也削减了负荷, 使 Case2、Case3 和 Case4 负荷降低; 18:00 之后分散负荷削减, Case2 和 Case4 的负荷降低。

调整层的联络线功率和电池功率如图 11 所示, 4 个算例的调整层功率基本都遵循调度层, 对比每个算例可知, Case1 的功率波动最大, Case2、Case3

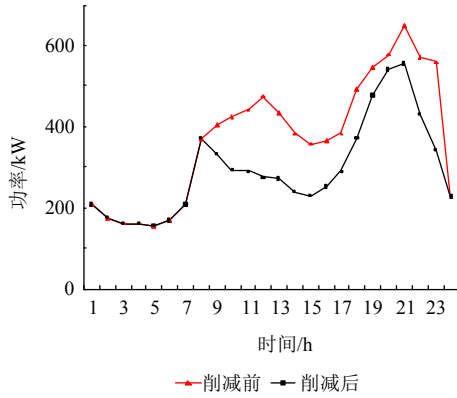


图 9 日前调度层分散负荷削减前后对比图

Fig. 9 The decentralized load before and after reduction in day-ahead scheduling layer

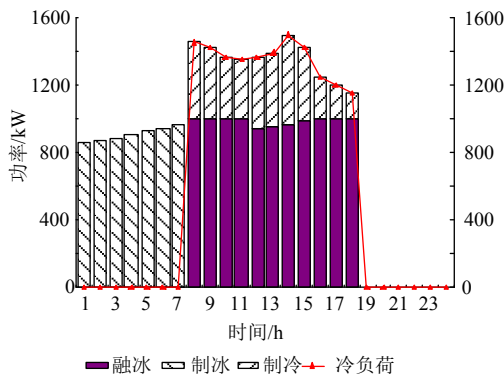


图 10 日前调度层冰蓄冷空调功率

Fig. 10 The power of ice-storage air conditioning in day-ahead scheduling layer

其次，Case4 功率波动最小。调整层分散负荷调整特性和冰蓄冷空调制冷机功率调整特性如图 12、图 13 所示，在整个 24h 时段内，分散空调负荷都能根据电负荷或光伏出力的波动进行调整，起到了平抑功率波动的作用；在 0:00—18:00 时段冰蓄冷空调处于制冷或制冰模式下，制冷机持续工作，其功率可以在一定范围进行调整，同样起到了平抑功率波动的作用。

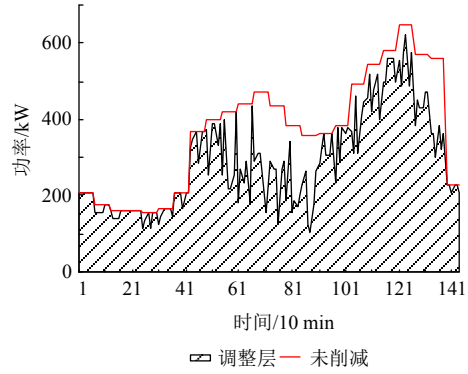


图 12 实时调整层分散负荷削减前后对比图

Fig. 12 The decentralized load before and after reduction in real-time dispatching layer

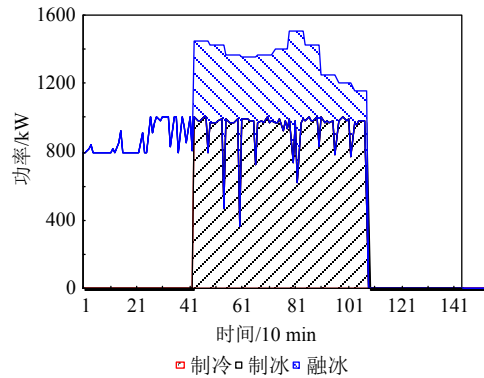


图 13 实时调整层冰蓄冷空调功率

Fig. 13 The power of ice-storage air conditioning in real-time dispatching layer

4 结语

本文针对含空调负荷的微网系统提出了一种多时间尺度的微网优化调度模型，并对此优化调度问题进行了仿真分析。算例分析表明：

- 1) 本文提出的微网优化调度策略，综合考虑了冰蓄冷集中空调负荷和分散空调负荷，充分发挥两者互补的调度潜力。
- 2) 在日前调度层中，通过冰蓄冷中央空调的负荷转移和分散空调负荷的削减同时减少了白天和夜间的冷负荷需求，降低了微网运行成本。
- 3) 在实时调整层中，通过冰蓄冷中央空调的制冷机功率调整和分散空调负荷调整，降低联络线、电池的功率波动。

本文以不同特性的空调负荷为研究对象，实现了微网成本和功率波动的降低，未来可以考虑其他的可控负荷，进一步发掘系统的调度潜力。由于冰蓄冷空调的制冷机功率调整将影响空调性能，未来研究中可以引入空调工作约束加以考虑。

参考文献

[1] 杨永标, 颜庆国, 徐石明, 等. 公共楼宇空调负荷参与电网虚拟

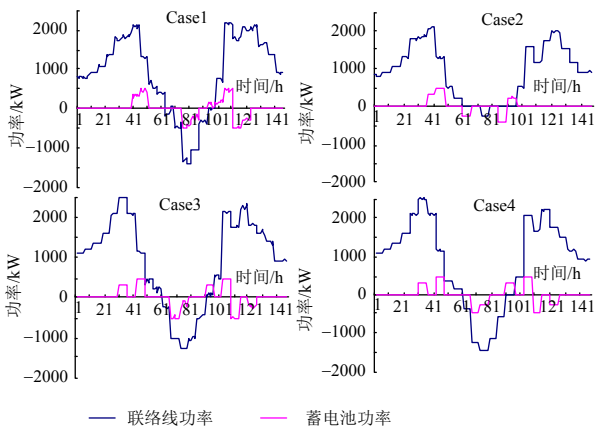


图 11 调整层联络线功率和电池功率

Fig. 11 The power of tie-line and battery in real-time dispatching layer

- 调峰的思考[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 103-107.
Yang Yongbiao, Yan Qingguo, Xu Shiming, et al. Thinking of public building air-conditioning load participating in grid with virtual peak clipping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 103-107(in Chinese).
- [2] 国家能源局. 2012 年全国电力迎峰度夏新闻发布会 [EB/OL]. (2012-06-13)[2017-05-04]. <http://www.Nea.Gov.cn/zwhd/wszb20120613/index.htm>.
- [3] 王丹, 范孟华, 贾宏杰. 考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2071-2077.
Wang Dan, Fan Menghua, Jia Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically controlled loads an deficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2071-2077(in Chinese).
- [4] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
Song Meng, Gao Ciwei, Su Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167(in Chinese).
- [5] Bao Z, Zhou Q, Yang Z, et al. A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution-part I: model and methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2257-2266.
- [6] 徐青山, 杨辰星, 颜庆国. 计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 156-163.
Xu Qingshan, Yang Chenxing, Yan Qingguo. Strategy of day-ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large-scale air conditioning loads[J]. Power System Technology. 2016, 40(1): 156-163(in Chinese).
- [7] Yang C, Qingshan X U, Wang X. Strategy of constructing virtual peaking unit by public buildings' central air conditioning loads for day-ahead power dispatching[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5(2): 187-201.
- [8] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.
Gao Ciwei, Li Qianyu, Li Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555(in Chinese).
- [9] 潘浩, 彭潇, 潘舒扬, 等. 考虑空调负荷的微网联络线功率波动平抑方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(8): 56-60.
Pan Hao, Peng Xiao, Pan Shuyang, et al. Smoothing method of microgrid tie-line power fluctuation considering air conditioning load[J]. Southern Power System Technology. 2016, 10(8): 56-60(in Chinese).
- [10] 丁庆, 段绍辉, 王执中, 等. 冰蓄冷空调在高峰谷负荷差地区应用的经济性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 28(1): 72-75.
Ding Qing, Duan Shaohui, Wang Zhizhong, et al. Economy of ice-storage air-condition used in the area of high peak-valley load difference[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 28(1): 72-75(in Chinese).
- [11] 李颖. 智能小区中空调负荷分析预测方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [12] Chen H J, Wang D W P, Chen S L. Optimization of an ice-storage air conditioning system using dynamic programming method[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(2-3): 461-472.
- [13] 徐青山, 吴泉, 杨斌. 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 33-42.
Xu Qingshan, Wu Xiao, Yang Bin. Dynamic optimization method of direct load control for air-conditioning load considering status diversity clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 33-42(in Chinese).
- [14] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
Chen Jian, Wang Chengshan, Zhao Bo, et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 25-31(in Chinese).
- [15] 管国兵, 辛洁晴. 空调负荷群分组控制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 40-46.
Guan Guobing, Xin Jieqing. Grouping control method for air conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 40-46(in Chinese).
- [16] Winston W L, Goldberg J B. Operations research: applications and algorithms[M], Boston: Duxbury press, 2004.
- [17] Palma-Behnke R, Benavides C, Lanas F, et al. A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 996-1006.



陈健

收稿日期: 2017-08-18。

作者简介:

陈健(1986), 男, 讲师, 硕士生导师, 通信作者, 研究方向为分布式发电和微网技术, E-mail: ejchen@sdu.edu.cn;

张维桐(1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网优化运行, E-mail: zhangweitong_zy@163.com。

(实习编辑 邵泽亮)