### 集群空调负荷双层动态优化调度决策方法

冯小峰1,林国营1,2,徐青山3,卢世祥1,谢添阔4

- (1. 广东电网有限责任公司计量中心,广东 广州 518049;
  - 2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;
  - 3. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;
  - 4. 华北电力大学 电力工程系,河北 保定 071003)

摘要:为了解决常规空调调度中切除负荷带来的电网运行稳定问题,在集群空调的调度中考虑空间上的优化组合,提出一种考虑网损和调度偏差最小的自上而下双层优化动态调度决策方法。在空调的聚类建模中,研究空调参数和运行状态的差异性,分析并验证聚类中的误差约束值和分组数对调度准确性的影响;在双层优化调度中,通过最优潮流计算合理地分配空间上调度的容量,有效减小网损与电压越限的可能性;结合动态调度,提高调度的准确性,保证用户的舒适性。IEEE 33节点配电网算例结果验证了所提算法的可行性和准确性。

关键词:空调负荷;网损;聚类建模;调度偏差;双层优化调度

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI: 10.16081/j.epae.202005012

#### 0 引言

2017年7月,江苏电网成为首个负荷破10°kW的省级电网,峰时用电最高达1.00024×10°kW,这也使其成为全国用电负荷最高的省级电网。其中空调用电负荷占比超过40%。夏季的负荷高峰也是空调的用电高峰,但是高峰持续时间却很短,始终提高装机容量来满足尖峰用电需要大量的投资[1]。而空调负荷本身具有良好的需求响应特性,具有较大的可调度潜力。例如居民分散式空调,通过对其合理的调控可以提供一定的备用容量[2-3],可避免仅依靠增加装机容量支撑峰荷造成的资源浪费,这也是实现夏季削峰的有效方式[4-5]。

空调建模的方法主要有等效热参数建模<sup>[6-7]</sup>和基于冷(热)负荷计算<sup>[8]</sup>的建模。综合考虑计算的精度和复杂度,本文选取常用的一阶等效热参数模型<sup>[9]</sup>。直接负荷控制是目前空调调控中最常见、最有效的控制方式<sup>[10-13]</sup>。周期性暂停控制作为其中最实用的方法,兼具开关控制<sup>[14]</sup>和调温控制<sup>[15]</sup>的优点。

对于周期性暂停控制,文献[16]建立以舒适度 为目标的状态阵列模型,实现对空调负荷的有效调 度。在此基础上,文献[17]结合温度区间的分离控 制,改善调控中负荷波动的现象。文献[18]提出集 中式、分布式和分层分布式3种空调负荷主动响应 的方式。但是以上研究都没有考虑如何在空间上合

收稿日期:2019-08-11;修回日期:2020-03-14

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM-20161607)

Project supported by the Science and Technology Program of China Southern Power Grid Company Limited (GDKJXM-20161607)

理地调控空调,基本假设1个节点下包含多台空调,或者脱离配电网的结构假设空调所处的位置均相同。然而实际上空调会处在配电网中的不同位置,而负荷的不断变化对网损也造成了不同的影响<sup>[19]</sup>。

为此,本文在调度中充分考虑集群空调负荷在空间上的优化组合,提出一种考虑网损和调度偏差最小的自上而下的双层优化动态调度方法。通过最优潮流计算合理地分配空间上调度的负荷量,改善电网的运行情况,并且结合动态调度和参数多样性,实现空调负荷的准确调度。

#### 1 集群空调负荷调控能力

本文以居民分散式空调为研究对象,以可调度 潜力作为聚类指标,基于空调负荷建模和负荷聚合 商的业务模式进行负荷统一调度和控制。

#### 1.1 空调负荷建模

基于空调负荷的等效热参数模型和舒适度准则,将室温 $T_{in}$ 变化设定在一个区间中。当温度达到空调设定温度上限 $T_{max}$ 时,空调开启;当温度下降至设定温度下限 $T_{min}$ 时,空调关停。由于空调房传热和散热,温度再次升高,直到需要空调重新开启,如此不断循环。假设室外温度 $T_{out}$ 、空调额定功率P、空调房等效热阻R为恒定值,一个启停控制周期h内关停时间为 $h_{out}$ ,开启时间为 $h_{out}$ 101。可得:

$$\begin{cases} T_{\text{max}} = T_{\text{out}} - (T_{\text{out}} - T_{\text{min}}) \varepsilon^{h_{\text{off}}} \\ T_{\text{min}} = T_{\text{out}} - \eta PR - (T_{\text{out}} - \eta PR - T_{\text{max}}) \varepsilon^{h_{\text{on}}} \end{cases}$$
(1)

其中, $\eta$  为空调能效比,表示空调器的制冷性能系数; $\varepsilon$  为散热系数, $\varepsilon$  =  $e^{-\Delta h/(RC)}$ , $\Delta h$  为仿真步长,C 为房屋的等效热容。

由于线性仿真模型与等效热参数模型相差不大,为简化计算,本文采用简化的线性仿真模型,得到空调关闭、开启时室内温度的变化公式为[10]:

$$T_{\text{in}}^{t+1} = \begin{cases} T_{\text{in}}^{t} + (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \Delta h / h_{\text{off}} & s = 1 \\ T_{\text{in}}^{t} - (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \Delta h / h_{\text{on}} & s = 0 \end{cases}$$
(2)

其中,s表示开关状态,其值为1表示开关关闭,为0表示开关开启; $T_{in}^{t}$ 、 $T_{in}^{t+1}$ 分别为t、t+1时刻的室温。

#### 1.2 空调的可调度潜力

空调的一个控制周期包括关停时间 $h_{\text{on}}$ 和开启时间 $h_{\text{on}}$ 。关停时间的长短可以反映空调可调度潜力的大小。每台空调的可关断时间H和相应等效热阻R、等效热容C及空调的初始状态有很大的关联。用A表示空调的初始状态<sup>[3]</sup>:

$$A(t) = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{in}}^{t}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}$$
 (3)

其中,A(t) = 0 表示室温处于空调温度上限  $T_{max}$ , A(t) = 1 表示室温处于温度下限  $T_{min}$ 。

由于调度周期 T较长, 一般将其划分为多个优化时间窗, 每个优化时间窗的优化周期为  $T_{\text{opt}}$ , 则一台空调的可关断时间为:

$$H = A(0)h_{\text{off}} + q_1h_{\text{off}} + q_3 \tag{4}$$

$$\begin{cases} T_{\text{opt}} = A(0)h_{\text{off}} + q_1h + q_2 \\ q_3 = \begin{cases} 0 & q_2 \le h_{\text{on}} \\ q_2 - h_{\text{on}} & q_2 > h_{\text{on}} \end{cases}$$
 (5)

 $A(0)h_{off}$ 为空调调控室温由初始状态上升至温度上限过程中的关断时间。在余下的时间中,空调进行反复多次的轮控,但是调度时间  $T_{opt}$  –  $A(0)h_{off}$  往往不能被控制周期h 整除,因此 $q_1$  为轮控的次数, $q_2$  为余下不满一个控制周期的时间。当 $q_2 > h_{off}$  可关断时间还需加上 $q_3$ 。具体推导见附录中图 A1。

空调的实时运行状态也随着空调的关停和开启发生变化:

$$A(t+1) = \begin{cases} A(t) - \Delta h/h_{\text{off}} & s=1\\ A(t) + \Delta h/h_{\text{on}} & s=0 \end{cases}$$
 (6)

用 $E^{\text{cap}}$ 表示n台空调总的可调度容量:

$$E^{\text{cap}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{h_{\text{off},i}}{h_i} P_{\text{ac}i}$$
 (7)

其中, $h_{\text{off},i}$ 、 $h_i$ 分别为第i台空调的关停时间和启停控制周期; $P_{\text{off}}$ 为第i台空调的额定功率。

#### 1.3 集群空调的聚类分析

聚类分析的目的是将可调度潜力接近的空调聚 类为一组以便于调度,并充分发挥空调负荷的可调 度潜力,因此选取 *H*(反映可调度潜力的综合指标) 作为判断各对象之间相似性的聚类指标。

假设1个节点下有n台空调, $S_n$ 为n台空调可关

断时间的样本,将H按照从小到大排序,H越大,表示可关断时间越长。

$$S_{H} = \left\{ H_{1}, H_{2}, \cdots, H_{n} \middle| H_{1} \leq H_{2} \leq \cdots \leq H_{n} \right\}$$
 (8)

采用具有高可操作性的最为经典的K-means 算法进行聚类。为了使得聚类的误差Z最小,用整个聚类的均方差来表示:

$$\min Z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{K} \sum_{H_i \in I_j} \left\| H_i - \overline{H_j} \right\|^2$$
 (9)

其中, $I_j$ 表示第j个聚类组; $\overline{H}_j$ 为第j组的聚类中心。式(9)是针对分组数为K的单次聚类的优化目标。为了合理选择初始聚类中心,使得各聚类组的容量基本接近,初始中心按照以下方式选取[3]:

$$\overline{H}_{j} = \sum_{i=I_{i}^{a}}^{I_{j}^{b}} H_{i} I(I_{j}^{b} - I_{j}^{a}) \quad j = 1, 2, \dots, K$$
 (10)

其中, $I_j^*$ 为第j个聚类组中的第一个元素编号; $I_j^b$ 为第j个聚类组中的最后一个元素编号。聚类的过程如下:

$$\sum_{i=I_a^b}^{I_b^b-1} P_{aci} \le \sum_{i=1}^n \frac{P_{aci}}{K} \le \sum_{i=I_a^b}^{I_b^b} P_{aci}$$
 (11)

由于可关断时间样本  $S_H$  是按从小到大排序的,从编号 i=1 的样本开始聚类,依次在 j=1 的聚类组中加入编号更大的样本直至满足式(11)。依此重复,得到  $j=2,3,\cdots,K$  的聚类组。根据式(11)可将空调分为 K 个组,每组功率总和基本为  $\sum_{i=1}^{n} P_{aci}/K$ 。为了使聚类的结果更加合理,需要考虑以下实际约束条件。(1)约束条件1。

# $\begin{cases} S_{\Sigma P} = \left\{ \sum_{i \in I_1} P_{\text{ac}i}, \sum_{i \in I_2} P_{\text{ac}i}, \dots, \sum_{i \in I_K} P_{\text{ac}i} \right\} \\ \frac{\max(S_{\Sigma P}) - \min(S_{\Sigma P})}{\left(S_{\Sigma P}\right)} \leq \delta^P \end{cases}$ (12)

其中, $\sum_{i \in I_j} P_{aci}$ 为第j个聚类组中所有空调的功率总

和; $S_{\Sigma P}$ 为所有聚类组的功率和的集合;为了调度的便捷性和准确性,各组的功率不应相差太大,因此在聚类分组时要求各组的功率偏差要不大于 $\delta^P$ , $\delta^P$ 的取值也会影响调度偏差,具体分析见 3.4 节中的(1)。

(2)约束条件2。

$$\begin{cases}
S_{A} = \{A^{1}, A^{2}, \dots, A^{K}\} \\
A_{k, \max} - A_{k, \min} \leq \delta^{A} \\
A_{k, \max}, A_{k, \min} \in A^{k} \quad k = 1, 2, \dots, K
\end{cases}$$
(13)

其中, $S_A$ 为所有聚类组初始状态的集合; $A^k$ 为第k个聚类组所有状态的集合; $A_{k,\max}$ 、 $A_{k,\min}$ 分别为第k个聚类组中状态的最大值和最小值; $\delta^A$  为初始运行状态的约束偏差,同组的空调负荷初始状态特征偏差不

3

大于该值, $\delta^4$  的取值也会影响到调度的精度,具体分析见3.4节中的(2)。

本文采取反复修正来满足聚类中的双重约束,即以 $I_{\kappa}(I_{1})$ 为起点,令总功率之和越限的组中初始状态较小(大)的移动到相邻编号小(大)一级的组中。

K值的选取具体分析见 3.4 节中的 (3)。本文基于负荷聚合商的调度能力确定最大分组数  $K_{max}$  后,分别设定分组数为  $1-K_{max}$  采用 K-means 算法进行聚类,得到相应的最小均方差下的聚类情况,然后再从中挑选均方差最小的聚类情况作为最终的最优聚类情况,如式 (14) 所示。

$$Z_{\min} = \min(Z_K) \quad K = 1, 2, \dots, K_{\max}$$
 (14)

其中, $Z_K$ 为分组数为K的最小均方差。

聚类的具体步骤如图1所示。

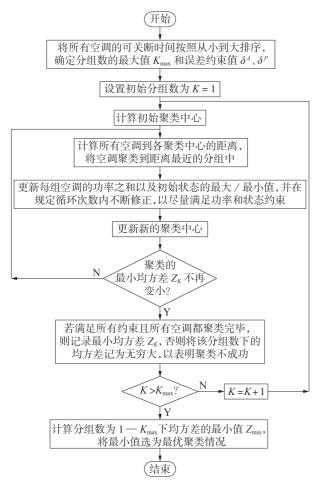


图1 聚类流程图

Fig.1 Flowchart of clustering

#### 2 双层优化调度分析

#### 2.1 上层网损最小

在空调优化调度中,一般仅考虑负荷削减总量, 而没有考虑负荷在空间上如何削减,这可能会导致 某一节点切除大量负荷,影响系统稳定运行。一般 而言,配电网中往往存在多个节点与负荷聚合商签 订协议,可以获得多点控制决策权,因此通过合理调控可以在保证节点电压不越限的情况下,减小配电网的网损<sup>[19]</sup>。

假设配电网的网损为 $P_{loss}$ ,其与各节点的有功功率、无功功率、电压有关。因此负荷空间上削减的差异性将导致网损的不同。假设系统中共有 $N_{um}$ 个节点,其中节点 1-m 可进行空调的调控操作,总共需要削减的负荷为 $P_{cut}$ , $X_1-X_m$ 分别为相应节点的空调削减量。系统的潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{i} = P'_{i} - X_{i} = U_{i} \sum_{j=1}^{N_{\text{num}}} U_{j} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{i} = U_{i} \sum_{j=1}^{N_{\text{num}}} U_{j} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ \sum_{r=1}^{m} X_{r} = P_{\text{cut}} \\ X_{r} = 0 \quad r = m+1, m+2, \dots, N_{\text{um}} \end{cases}$$
(15)

其中, $i=1,2,\cdots,N_{um}$ ;  $P'_i$ 为节点i原注入有功功率;  $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为负荷削减后节点i的有功和无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$ 分别为节点i和j的电压; $G_{ij}$ 、 $S_{ij}$ 、 $S_{ij}$ 分别为节点i与j之间的电导、电纳及相角差; $X_r$ 为节点r的负荷削减量。

计算节点 1-m的可调度潜力分别为  $E_1^{\text{cap}}-E_m^{\text{cap}}$ ,这也是节点空调负荷削减的上限,考虑电压越限约束,以网损最小为目标,进行最优潮流计算,求出最小网损值。所得解  $X_1-X_m$  为各节点在下层调度中设定的负荷削减目标。优化目标定义为:

$$\begin{split} F &= \min P_{\text{loss}} = \\ &\sum_{i=1}^{N_{\text{um}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{um}}} \left[ \alpha_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j) \right] = \\ &f \left( X_1, X_2, \dots, X_m \right) \end{split}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_i} \cos \delta_{ij}, \ \beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_i} \sin \delta_{ij}$$
 (16)

其中, $r_{ij}$ 为节点i和j之间的电阻。在计算中主要考虑电压约束与负荷削减约束,如式(17)所示。

$$\begin{cases} X_r \leq E_r^{\text{cap}} & r = 1, 2, \dots, m \\ \underline{U}_i \leq U_i \leq \overline{U}_i & i = 1, 2, \dots, N_{\text{um}} \end{cases}$$
 (17)

其中, $U_{\cdot}$ 、 $\bar{U}_{i}$ 分别为节点i的电压下限和上限。

#### 2.2 下层调度偏差最小

为了实现实时准确的调度,必须考虑以下问题:

- (1)当调度周期 *T*过长时,外界温度发生变化, 无法作为准确的调度标准,且各地的温度存在差异;
- (2)当空调经过调控后,其运行状态发生变化, 需要对空调的状态进行更新修正,也需要进行新一 轮的聚类分组。

因此,将较长的调度周期T采用优化时间窗进行划分,得到多个优化周期 $T_{out}$ 。

$$T = T_{\text{opt}} W \tag{18}$$

其中,W为优化时间窗的个数。在每个新的优化时间窗中,不断修正室外温度和空调运行状态,对空调重新进行聚类分析和优化调度,实现动态调度。

以 2.1 节中的假设为例,已经得到节点 1 - m 对应的负荷削减目标  $X_1 - X_m$ ,现在依次对各节点进行最优调度。以节点  $r(r=1,2,\cdots,m)$  为例,需要削减的空调负荷量为  $X_r$ ,节点 r 共有  $n_r$  台空调,聚类成  $K_r$  组。调度目标为:

$$\min P_{\text{error}} = \sum_{w=1}^{W} \sum_{v=1}^{T_{\text{opt}}} \left( \sum_{k_r=1}^{K_r} s_{w,v}(k_r) \sum_{i \in I_{k_r}} P_{\text{ac}i} - X_r \right)$$
 (19)

其中,  $\sum_{i \in I_k} P_{aci}$  为第  $k_r$ 个聚类组中所有空调的功率总

和; $s_{w,v}(k_r)$ 表示第 $k_r$ 组空调在第w个优化时间窗内v时刻的关停与开启状态,其值为1表示空调关闭,为0表示空调开启; $P_{error}$ 为一个调度周期各时刻调度偏差之和。

舒适度约束为:

$$T_{\min} \le t_{w,v}(k_r) \le T_{\max} \tag{20}$$

其中, $t_{w,v}(k_r)$ 为第w个优化时间窗内v时刻第 $k_r$ 组空调对应的温度,所有温度构成集合  $\{t_{w,v}(k_r)\}$ 。考虑到用户的舒适性,在优化过程中的每个优化时间窗内,每一组空调都要满足温度上下限约束,因此需要对每一个聚类组可选择的决策样本进行筛选,以保证在开关操作的整个周期内满足空调温度不越限的约束。具体的筛选过程与调度过程分析见附录中图 A2 和表 A1。

考虑到若优化周期 $T_{opt}$ 偏小,则需要进行多次数据采集和调度决策,调度成本增大,若优化周期 $T_{opt}$ 偏大,则调度偏差也会相应增大,因此优化周期的确定必须综合考虑调度的成本和精度。

#### 2.3 双层优化调度方法

本文提出一种考虑网损和调度偏差最小的自上 而下双重优化调度方法,流程图如图2所示。

#### 3 算例

#### 3.1 系统及参数介绍

选用图 3 所示 IEEE 33 节点配电网作为算例系统<sup>[19]</sup>。对系统进行等比例扩大,使得系统满足大规模空调调控的条件。假设图 3 中节点 6、7、23、24、29、31 有大量空调接人,并且是已签约可调控的负荷。空调参数如表 1 所示。

6个节点接入的空调总数为1600台,*R*、*C*都服从连续高斯分布。为了简化模型,假定江苏省某城市夏季某日调控时段13:00—14:00的室外温度为37℃。对于夏季用电高峰期,电力公司将制定负荷削减的计划。根据温度预测,对6个节点按式(7)计

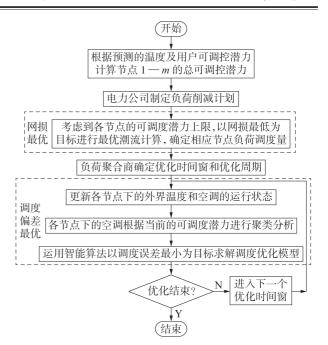


图 2 双层优化调度流程图

Fig.2 Flowchart of bi-level optimization dispatch

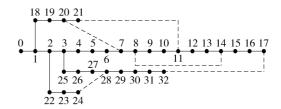


图3 IEEE 33节点配电网

Fig.3 IEEE 33-bus distribution network

表1 空调参数

Table 1 Air-conditioning parameters

节点	空调 功率 / kW	空调 数量 / 台	η	R	С
6,7	1.5	100	2.8	$N(0.17, 0.2^2)$	$N(5.45,1^2)$
	2.0	100	2.8		
23,24	1.5	200	3.0	$N(0.19, 0.2^2)$	$N(5.55,1^2)$
	2.0	200	3.0		
29,31	1.5	100	3.2	$N(0.2, 0.2^2)$	N(5.65,1 <sup>2</sup> )
	2.0	100	3.2		

算得到的可调度潜力如表 2 所示。假定负荷削减量为  $1000 \, \mathrm{kW}$ ,调度周期  $T=1 \, \mathrm{h}$ ,设置  $4 \, \mathrm{h}$  化化时间窗。由于人体舒适的温度区间为  $[23,27] \, \mathrm{C}$ ,因此假设初始时刻空调房温度随机分布在  $[23,27] \, \mathrm{C}$  范围内。

表2 6个节点的可调度潜力

Table 2 Schedulable potential of six buses

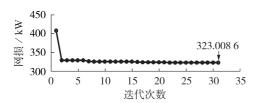
节点	可调度潜力 / kW	节点	可调度潜力 / kW
6	200.7484	24	411.0058
7	201.8097	29	198.5856
23	416.9935	31	198.2682

#### 3.2 网损优化分析

以表2中的可调度潜力为约束,代入式(15)—



(17)进行最优潮流计算。图4反映了迭代过程中网 损随迭代次数的变化情况。表3为最优潮流结果, 从表中可以看出,最优网损值为323.0086kW,表中 同时列出了此时6个节点的负荷削减量。



#### 图 4 最优潮流迭代过程中的网损值

Fig.4 Network loss value in iterative process of optimal power flow

表3 最优潮流结果

Table 3 Results of optimal power flow

节点	负荷削减量 / kW	最优网损值/kW	
6	200.7484		
7	201.8097		
23	0	323.0086	
24	200.5881		
29	198.5856		
31	198.2682		
23 24 29	0 200.5881 198.5856	323.0086	

在上层调度中,当不考虑网损时,切除负荷的节点及负荷量随机。现假设2种方式:方式1为节点6、23分别切除负荷300、700 kW,方式2为节点24、31分别切除负荷700、300 kW,2种方式下的网损值分别为356.8503 kW和343.4144 kW,分别约超出最小网损值10%和6%。图5为3种切负荷方式下的各节点电压(图中 $U_{opt}$ , $U_{c1}$ , $U_{c2}$ 分别为本文优化调度方法及方式1和方式2下的电压,均为标幺值)。可以看出,方式1和方式2下的电压比本文优化调度方法下的电压下降得多。不同场景的电压变化不同,但是由于本文所提方法在计算上层网损最小时考虑了电压约束,因此可降低电压越限的可能。

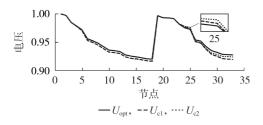


图 5 3 种调度方式下的电压值

Fig.5 Voltage values under three dispatch modes

#### 3.3 调度对比分析

在下层调度中,当不考虑网损时,仍以式(19)作为优化目标。对比考虑网损和不考虑网损对调度偏差与舒适度的影响。不考虑网损时仍采用3.1节设置的参数,对各节点下的所有1600台空调进行统一调度,不考虑其所处的节点。考虑网损时设置 $\delta^p$ =

0.2、 $\delta^4$  = 0.55、K = 15,不考虑网损时设置  $\delta^p$  = 0.2、 $\delta^4$  = 0.55、K = 25。由于 1600 台空调统一调度,相应增大了聚类分组数。各受控点总负荷削减量的调度偏差如图 6(a)所示。可以看出,考虑网损时总负荷削减量的偏差要小于不考虑网损时的偏差。这是因为对 1600 台空调进行统一调度时,聚类分组得到的每组功率之和大幅增加,以组为单位进行调度精度会下降。但是不断增加分组数,不仅会超出聚合商的调度能力,还会增加聚类的难度。选取 2 种方式下的 400 台空调,绘制其调度结束后的温度变化,如图 6(b)所示,可见温度变化满足舒适度要求。

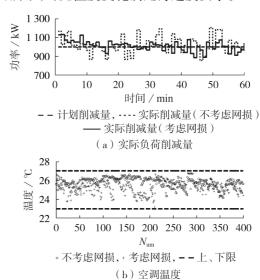


图 6 考虑网损与不考虑网损时的实际负荷 削减量与空调温度

Fig.6 Actual load reduction and air-conditioning temperature with and without considering network loss

#### 3.4 双层优化调度分析

为进一步提高双层优化调度的精度,下文着重分析功率偏差 $\delta^{P}$ 、空调状态偏差 $\delta^{A}$ 和聚类分组数K对优化结果的影响。采用控制变量法,首先设置 $\delta^{P}$  = 0.2、 $\delta^{A}$  = 0.55、K = 15,得到调度结果如图7所示。

#### (1)功率偏差 $\delta^{P}$ 对优化结果的影响。

图 8 为功率偏差分别为 0.25、0.3 时的功率调度及网损情况。由图 8(a)可知,随着功率偏差 8°不断增大,调度偏差不断增大,3次调度的平均误差分别为 4.2%、4.8%、5.7%。由于 8°越大,各组的功率相差较大,在选择调控各组的空调时便会产生较大的差异。相应地,当负荷削减不足时,网损也会增加。由图 8(b)看出,网损在最小值 323.008 6 kW上下波动,最大增幅为最小值的 3% 左右。调度功率的误差会直接影响网损大小。

#### (2)空调状态偏差 $\delta^{A}$ 对优化结果的影响。

图 9 为空调状态偏差  $\delta^4$  分别为 0.65、0.75 时的 功率调度及网损情况。由图 9(a) 可知,随着  $\delta^4$  不断

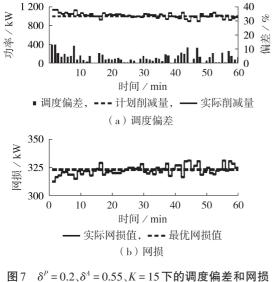
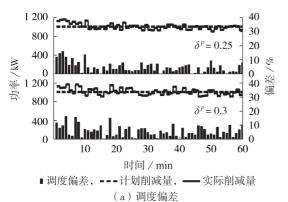


图 7  $\delta^P = 0.2, \delta^A = 0.55, K = 15$  下的调度偏差和网括 Fig.7 Dispatch deviation and network loss with  $\delta^P = 0.2, \delta^A = 0.55$  and K = 15



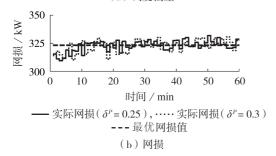


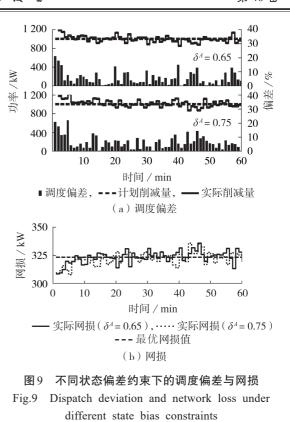
图 8 不同功率偏差约束下的调度偏差与网损 Fig 8 Dispatch deviation and network loss under

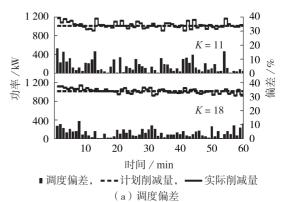
Fig.8 Dispatch deviation and network loss under different power deviation constraints

增大,调度偏差也不断增大,3次调度的平均误差分别为4.2%、5.4%、6.3%。由于空调状态直接影响空调的可调度潜力,当状态偏差较小时,各组空调的调度潜力较接近,整个组的可调裕度也会增加。调度的弹性增大,误差也会相应减小。分析可知, $\delta$ "与 $\delta$ 4越小越好,但是在实际中由于K的约束,两者取值无法无限减小,只能在满足K的约束下找到最优值。

#### (3)聚类分组数 K 对优化结果的影响。

图 10 为 K 分别为 11、18 时的功率调度及网损情况。由图 10(a)可以看出,分组数为 11 时的调度偏





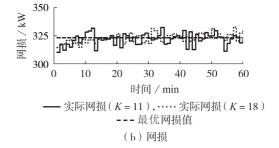


图 10 不同聚类组数下的调度偏差与网损 Fig.10 Dispatch deviation and network loss under different clustering numbers

差明显大于分组数为15时的调度偏差,平均调度偏差分别为5.4%、4.2%。这是由于K越大,调度方式越多,可操作空间大,同时也可以实现较小的 $\delta$ <sup>t</sup>和 $\delta$ <sup>t</sup>,这使得调度的准确性提高。而当K=18时,虽然分组数变大,调度偏差却没有显著降低,和K=15时相近,均为4.2%左右,但是K取 18显然增大了调度



成本。因此,K值的选取要综合考虑调度偏差和调度成本,当调度偏差下降较小时,则无需再增加K的值。

#### 4 结论

本文考虑集群空调参数和运行状态的差异性, 提出一种考虑网损和调度偏差最小的自上而下双层 优化动态调度方法。通过算例分析得到以下结论。

- (1)配电网网损与负荷削减的位置有关,对系统进行最优潮流计算,按照计算的削减量在空间上合理调控空调,可以有效地减少配电网网损,优化配电网的运行,减小了电压越限的可能性。
- (2)聚类中功率偏差约束 $\delta^r$ 、集群空调状态偏差约束 $\delta^A$  及分组数K与调度的准确性有着直接的关系,因此在聚类中需要合理选取 $\delta^r$ 、 $\delta^A$  与K。
- (3)本文提出的双层优化方法可以使调度偏差和网损增加控制在5%以内,验证了该方法的准确性。同时相较于统一调度,对节点进行单独调度的方式也提高了调度精度,降低了聚类的难度。

但是本文方法也存在一些不足,例如本文控制策略需要不断地进行调整,对于百万户的居民调控而言成本较高,本文的对象也比较单一。未来可以在本文方法的基础上研究居民分散式空调和楼宇中央空调、定频空调与变频空调的综合优化方法;对于规模化空调用户的数据采集也是未来值得深入研究的方向。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 朱宇超,王建学,曹晓宇. 中央空调负荷直接控制策略及其可调度潜力评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):227-234.

  ZHU Yuchao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Direct control strategy of central air-conditioning load and its schedulable potential evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2018, 38(5):227-234.
- [2] 米增强,张文彦,贾雨龙. 柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的 优化控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):15-20,27. MI Zengqiang, ZHANG Wenyan, JIA Yulong. Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(11):15-20,27.
- [3] 徐青山,吴枭,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):
  - 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.
- [4] UPSHAW C R, RHODES J D, WEBBER M E. Modeling peak load reduction and energy consumption enabled by an integrated thermal energy and water storage system for residential air conditioning systems in Austin, Texas[J]. Energy and Buildings, 2015, 97:21-32.

- [5] ESCRIVÁ-ESCRIVÁ G, SEGURA-HERAS I, ALCÁZAR-ORT-EGA M. Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems[J]. Energy and Buildings, 2010, 42 (11): 2258-2267.
- [6] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):189-198.
- [7] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1263-1270.
- [8] PEPPANEN J, RENO M J, GRIJALVA S. Thermal energy storage for air conditioning as an enabler of residential demand response [C]//2014 North American Power Symposium (NAPS). Pullman, WA, USA; IEEE, 2014; 1-6.
- [9] 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.
- [10] 王东,曾沅,穆云飞,等. 采用温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J]. 电网技术,2015,39(12):3457-3462. WANG Dong,ZENG Yuan, MU Yunfei, et al. An optimization method for new energy utilization using thermostatically controlled appliances[J]. Power System Technology,2015,39(12): 3457-3462.
- [11] CHU C M, JONG T L. A novel direct air-conditioning load control method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1356-1363.
- [12] WEI D C, CHEN N M. Air conditioner direct load control by multi-pass dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1):307-313.
- [13] PERFUMO C, BRASLAVSKY J H, WARD J K. Model-based estimation of energy savings in load control events for thermostatically controlled loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(3):1410-1420.
- [14] YAO L, CHANG W C, YEN R L. An iterative deepening genetic algorithm for scheduling of direct load control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3):1414-1421.
- [15] HONG Y Y, LIN J K, WU C P, et al. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1603-1610.
- [16] LU N, CHASSIN D P. A state-queueing model of thermostatically controlled appliances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1666-1673.
- [17] 周磊,李扬,高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5579-5589. ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [18] 张志丹,黄小庆,曹一家,等. 电网友好型空调负荷的主动响应 策略研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4207-4218. ZHANG Zhidan, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Research on active response policy for grid friendly air conditioning load[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4207-4218.
- [19] 刘栋,陈允平,沈广,等. 负荷随机性对网损计算和配电网重构的影响[J]. 电力系统自动化,2006,30(9):25-28,55. LIU Dong,CHEN Yunping,SHEN Guang, et al. Influence of stochastic loads on line loss calculation and distribution re-

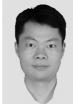
configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9):25-28,55.

#### 作者简介:

冯小峰(1984—),男,湖南沅江人,高级工程师,博士,主要研究方向为需求侧管理、电力系统优化与控制(E-mail: ucihqtep@163.com);

林国营(1982—),男,广东梅州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电能计量技术;

徐青山(1979-),男,江苏泰州人,教授,博士,主要研究



冯小峰

方向为电力系统优化运行与控制;

卢世祥(1986—),男,广东广州人,高 级工程师,博士,主要研究方向为电能量数 据挖掘应用、智能用电(E-mail:lu.shixiang@qq.com);

谢添阔(1995—),男,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场需求响应。

(编辑 王锦秀)

## Bi-level dynamic optimization dispatch decision method for cluster air-conditioning loads

FENG Xiaofeng<sup>1</sup>, LIN Guoying<sup>1,2</sup>, XU Qingshan<sup>3</sup>, LU Shixiang<sup>1</sup>, XIE Tiankuo<sup>4</sup>

- (1. Metering Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 518049, China;
- 2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
- 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
- 4. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to solve the stability problem of power grid caused by load removal in conventional air-conditioning dispatch, a top-down bi-level dynamic dispatch decision method considering the minimum network loss and dispatch deviation is proposed, which considers the optimal spatial combination in the dispatch of cluster air-conditioning. In the cluster modeling of air-conditioning, the differences of parameters and operation conditions of air-conditioning are researched, and the influence of error constraint value and grouping number on dispatch accuracy in the cluster is analyzed and verified. In the optimal bi-level dispatch, the spatial dispatch capacity is reasonable allocated by the optimal power flow calculation, which effectively reduces the network loss and the voltage over-limit possibility. The dispatch accuracy is improved and user comfort is ensured by the combination of dynamic dispatch. The results of IEEE 33-bus distribution network example verify the feasibility and accuracy of the proposed algorithm.

**Key words:** air-conditioning loads; network loss; cluster modeling; dispatch deviation; bi-level optimization dispatch

#### 附录:

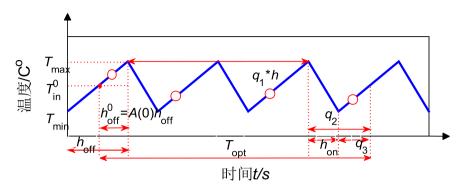


图 A1 空调可关断时间计算示意图

Fig.A1 Schematic diagram of the of shutoff time calculation of air conditioning

图中 
$$A(0) = \frac{T_{\max} - T_{\text{in}}^0}{T_{\max} - T_{\min}^0}$$
 为空调的初始状态。由图中的比例关系可知  $\frac{T_{\max} - T_{\text{in}}^0}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{h_{\text{off}}^0}{h_{\text{off}}} = A(0)$ 。

因此  $A(0)h_{\rm off}$  为空调由初始状态第一次上升至温度区间上限时的关断时间  $h_{\rm off}^0$  。在之后的调度时间中,空调进行反复多次的轮控,但是调度时间  $T_{\rm opt}-A(0)h_{\rm off}$  往往不能被控制周期 h 整除,所以  $q_1$  为轮控的次数,  $q_2$  为余下不满一个控制周期的时间,即  $T_{\rm opt}=A(0)h_{\rm off}+q_1h+q_2$ 

但是当
$$q_2 > h_{\text{on}}$$
时,可关断时间仍需加上 $q_3$ ,  $q_3 = \begin{cases} 0 & q_2 \le h_{\text{on}} \\ q_2 - h_{\text{on}} & q_2 > h_{\text{on}} \end{cases}$ 。

可关断时间 H 即为图中标圆圈的几段相加,即  $H = A(0)h_{\text{off}} + q_1h_{\text{off}} + q_3$ 

表 A1 节点 6聚类小组 14 温度情况

Table A1 Temperature conditions of Clustering group 14 of Bus 6

Tuest III Temperature conditions of Clastering group I . of Bas c				
空调编号	优化窗 3 结束温度/℃	优化窗 4 结束温度/℃		
170	25.483 88	24.945 78		
127	25.299 07	24.978 40		
131	25.272 77	25.076 42		
199	25.239 02	25.239 02		
155	25.199 03	25.009 42		
114	25.132 99	24.859 95		
198	25.009 42	24.608 62		
179	24.987 53	24.549 73		
163	24.945 78	24.424 17		

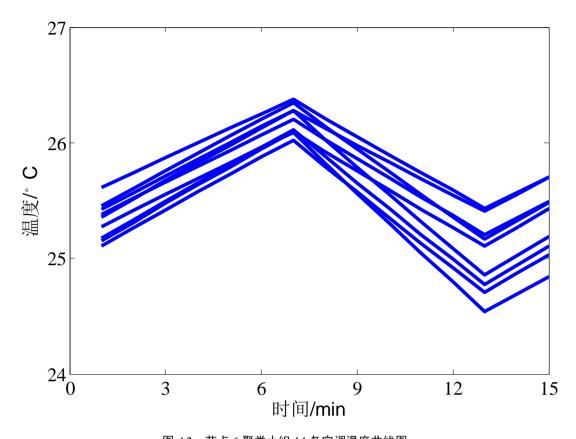


图 A2 节点 6 聚类小组 14 各空调温度曲线图

Fig.A2 Temperature profiles of air conditioning of Clustering group 14 of Bus 6

以遗传算法为例说明筛选的过程。分别以 $T_{max}$ 和 $T_{min}$ 作为空调温度的上、下限。首先生成一个优化时间窗所有组空调的多维决策样本,即染色体样本。计算该决策下空调是否会出现温度越限问题,若越限则舍弃该样本。不断循环生成满足要求的染色体样本,直到达到一定的种群数量。此时的样本满足温度约束但是调度偏差较大。所以需要进行多次的遗传迭代,通过交叉变异不断筛选,最后从结果中选出调度偏差最小的决策样本。

以一个聚类小组为单位分析空调启停的状态量。选取节点 6 第四个优化时间窗聚类小组 14 的空调温度情况,未分组前空调编号 1—200。聚类小组 14 中的空调编号如表 A1 所示。第四个优化时间窗内空调启停状态的决策结果如下(0 表示关闭,1 表示开启):

#### $(0 \ 0 \ 00000111111100)$

由表 A1、图 A2 可以看出,所有的空调的温度都在 23~27℃范围内,满足用户舒适度的要求。同时可以发现空调并没有达到上下限,这是由于受控于大目标负荷削减量的要求,并且需要配合其他聚类组的情况,用户端的空调虽希望尽可能发挥可调控潜力,但无法总是发挥它的最大潜力。