

# 空调负荷的混合逻辑动态建模和自治控制方法

王永权, 张沛超, 姚 焱

(上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 随机性可再生能源接入微网降低了联络线功率的可调控性与可计划性, 聚合大规模空调负荷(ACL)的灵活性可以有效解决这个问题。首先建立了单台 ACL 的混合逻辑动态(MLD)模型, ACL 可基于 MLD 模型响应控制信号并自行求解开关序列, 实现自治控制。其次, 为了提高微网对联络线计划功率的跟踪精度, 利用空调集群的调节能力校正微网内可再生能源和负荷的日前预测偏差。最后, 利用含 1 000 台 ACL 的微网算例进行了仿真计算。仿真结果表明, 利用 ACL 的自治性, 该方法能够聚合大规模 ACL 的灵活性提高微网联络线功率的可计划性, 同时有效保证用户的舒适度与设备安全。

**关键词:** 微网; 空调负荷; 信息物理系统; 混合逻辑动态; 自治控制; 日前联络线计划

**中图分类号:** TM 715

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.201912007

## 0 引言

未来电网将接入大量分布式可再生能源, 其波动性和随机性的特点会提高电网对于备用容量和爬坡资源的需求, 降低电网的安全性及经济性。利用微网技术就地提高每条微网联络线功率的可调控性和可计划性是解决这个问题的有效途径<sup>[1]</sup>。

微网的灵活性主要来自储能、电动汽车、空调等柔性负荷, 其中, 空调负荷 ACL (Air Conditioning Load) 具有总规模大、响应速度快等特点<sup>[2]</sup>, 具有重要的利用价值。文献[3]建立了 ACL 的状态序列模型, 对其采用直接负荷控制实现目标跟踪, 但该方法要求获得设备控制权, 且通信成本较高。文献[4]提出了分层分布式控制方法, 通过求解最优设定值的方式跟踪目标, 但该方法需要各区域控制中心收集 ACL 的模型参数和用户偏好, 难以保护用户隐私。

近年来, 研究人员注意到 ACL 的物理动态过程与其控制过程紧密耦合, 可从信息物理系统 CPS (Cyber-Physical System) 的视角研究新型控制策略。文献[5]从 CPS 的角度介绍了 ACL 所具有的控制模型和物理模型, 但未用具体的数学模型描述两者之间的联系。文献[6]利用 CPS 建模降低 ACL 的暂态和稳态电力消耗, 但该文仅以单台空调为研究对象。基于 CPS 思想建立最优控制策略, 关键是实现连续物理动态与离散控制逻辑这 2 类不同性质过程的完整数学描述。为此, 文献[7-10]采用了混合逻辑动态 MLD (Mixed Logical Dynamic) 模型: 文献[7-8]从电网信息物理融合的需求出发, 以空调等柔性负荷为例说明了 MLD 建模的步骤和控制方法; 文献[9]

针对微网中储能和分布式电源采用 MLD 建模; 文献[10]基于 MLD 模型构建用户侧 ACL、热水器等温控负荷模型, 并采用模型预测控制实现日内优化。但现有研究存在如下问题: ①文献[7-10]都采用集中式控制, 需要联立求解包含所有负荷的 MLD 方程的最优化问题, 难以适应大规模柔性负荷的控制问题; ②目前研究在对 ACL 进行建模时, 均未考虑闭锁时间约束<sup>[6-7, 10]</sup>, 容易加剧设备的磨损甚至因频繁启停而损坏压缩机, 影响设备安全<sup>[11]</sup>。

总体而言, 对大规模 ACL 的有效利用, 既要满足微网或聚合商的要求 (即降低控制模型的复杂度和实施代价), 又要满足用户关于舒适度、设备安全和数据隐私的要求。为了兼顾上述要求, 本文提出了一种旨在提高 ACL 自治性的控制方法, 该方法基于 MLD 模型建立了单台 ACL 的 CPS 模型, 能够充分考虑闭锁时间和舒适度约束, 并向微网准确提供 ACL 的调节灵活性, 使微网易于聚合大量具有自治性的 ACL, 提高联络线功率的可计划性。

## 1 ACL 的 MLD 建模

### 1.1 混合自动机模型

ACL 物理动态过程与控制逻辑的耦合关系可以用图 1 所示的混合自动机模型描述。图中, 混合自动机模型的连续物理动态过程可用二阶等效热参数 ETP (Equivalent Thermal Parameter) 表示;  $T_a$  为室内气体温度; 设  $\delta_i$  为 ACL 开关状态,  $\delta_i=1$  表示空调开启 (ON 或 ONLOCK),  $\delta_i=0$  表示空调关闭 (OFF 或 OFFLOCK)。为了保证舒适度并保护设备安全, ACL 设置了 ON、ONLOCK、OFF、OFFLOCK 4 个状态, 其中, ON 和 ONLOCK 均为空调的开启状态, 区别在于前者已满足闭锁时间  $t_{onlock}$  要求, 可随时关闭; OFF 和 OFFLOCK 均为关闭状态, 区别在于前者已满足闭锁时间  $t_{offlock}$  要求, 可随时开启。为了不失一般

收稿日期: 2018-12-22; 修回日期: 2019-10-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0903000)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0903000)

性,本文假设开启与关闭状态的闭锁时间相等,均记为 $t_{\text{lock}}$ ,其值为3~5 min<sup>[12]</sup>。

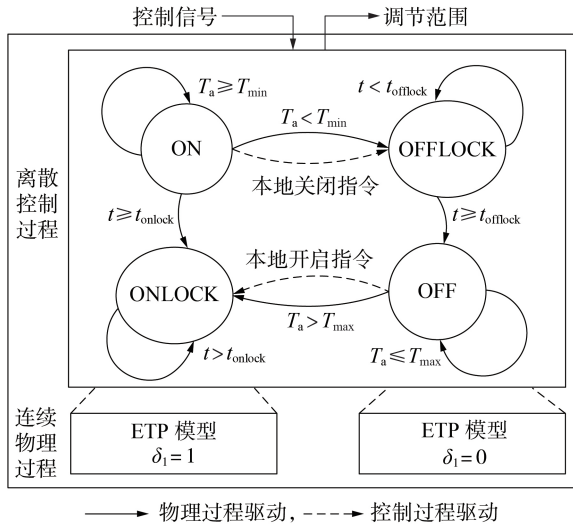


图1 ACL的混合自动机模型

Fig.1 Hybrid automation machine model of ACL

ACL依据图1所示的混合自动机模型实现自治运行,同时,还能估计并上报其功率调节范围,并接收和执行来自微网的控制信号,从而参与协调控制。

但上述基于有限状态机的控制逻辑无法与ACL的物理动态过程进行统一的数学描述。为此,本文引入MLD模型对ACL进行建模,这样便于对系统进行优化控制。

## 1.2 MLD模型

首先讨论图1中连续物理动态过程的建模方法。设第*i*台ACL的允许室温区间为 $[T_{\min,i}, T_{\max,i}]$ ,则其物理过程可用如下ETP模型表示<sup>[12-14]</sup>:

$$\begin{cases} C_a \frac{dT_a(t)}{dt} = T_m(t)H_m - (U_a + H_m)T_a(t) + Q_a + T_o(t)U_a \\ C_m \frac{dT_m(t)}{dt} = H_m(T_a(t) - T_m(t)) + Q_m \\ Q_a = \delta_1(t)Q_{ac} + f_1Q_i + f_2Q_s \\ Q_m = (1-f_1)Q_i + (1-f_2)Q_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $U_a$ 为室内外的等效阻抗, $H_m$ 为室内空气与固体的等效阻抗, $C_a$ 为室内空气热容, $C_m$ 为固体热容, $f_1$ 、 $f_2$ 为传热系数,为不失一般性,本文取 $f_1=f_2=0.5$ ,以上为不可直接测量参数,反映建筑物固有特性,可通过在线参数辨识方法获得; $T_m$ 和 $T_o$ 分别为室内固体温度和室外温度; $Q_a$ 和 $Q_m$ 分别为室内气体和固体传热量; $Q_i$ 和 $Q_s$ 分别为室内热源传热量和太阳辐射热量,其为可直接测量参数,可通过传感器测量; $Q_{ac}$ 为空调传热量,可由空调铭牌参数获得。

下面讨论图1中离散控制逻辑过程的建模方法。空调控制逻辑可以用以下命题描述:① $[T_{a,i}(k) \geq$

$T_{\max,i}] \rightarrow [\delta_{1,i}(k)=1]$ ;② $[T_{a,i}(k) \leq T_{\min,i}] \rightarrow [\delta_{1,i}(k)=0]$ ;③ $[\delta_{1,i}(k) \oplus \delta_{1,i}(k-1)=1] \rightarrow [t_i(k)=0]$ ;④ $[\delta_{1,i}(k) \oplus \delta_{1,i}(k-1)=0] \rightarrow [t_i(k)=t_i(k-1)+\Delta t]$ ;⑤ $[t_i(k) \leq t_{\text{lock}}] \rightarrow [\delta_{1,i}(k) \oplus \delta_{1,i}(k+1)=0]$ 。其中, $\Delta t$ 为空调控制间隔,即图1中空调状态切换的最小间隔,本文取1 min; $k$ 为控制间隔索引; $t_i(k)$ 为计时器; $\rightarrow$ 为蕴含连接词; $\oplus$ 为异或关系。

上述命题中,命题①表示当室温不低于上限时,空调需开启;命题②表示室温未超过下限时,空调需关闭;命题③表示空调运行状态变化时,计时器清零;命题④表示空调运行状态不变时,计时器增加 $\Delta t$ ;命题⑤表示计时器时间未超过闭锁时间时,禁止ACL的运行状态发生变化,以防止其频繁启停。

根据文献[15]中给出的连续复合命题与混合逻辑不等式之间的对应关系,将上述命题转化为不等式,转化过程如下。

考虑到死区问题, $T_{a,i}$ 实际能达到的范围为 $[T_{\min,i}-\Delta T, T_{\max,i}+\Delta T]$ 。其中, $\Delta T$ 为温度死区大小,本文取0.5℃。则命题①和②等价于如下线性不等式组:

$$\begin{cases} T_{\max,i} - T_{a,i}(k) \geq \varepsilon + (-\Delta T - \varepsilon)\delta_{1,i}(k) \\ T_{a,i}(k) - T_{\min,i} \geq \varepsilon + (-\Delta T - \varepsilon)(1 - \delta_{1,i}(k)) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\varepsilon$ 为正的微小量。

为了将命题③—⑤转化为不等式,本文引入辅助逻辑变量 $\delta_{2,i}(k)$ ,使:

$$\delta_{2,i}(k) \leftrightarrow [\delta_{1,i}(k) \oplus \delta_{1,i}(k-1)] \quad (3)$$

则 $\delta_{2,i}(k)$ 与 $\delta_{1,i}(k)$ 和 $\delta_{1,i}(k-1)$ 满足:

$$\begin{cases} -\delta_{1,i}(k) - \delta_{1,i}(k-1) + \delta_{2,i}(k) \leq 0 \\ -\delta_{1,i}(k) + \delta_{1,i}(k-1) - \delta_{2,i}(k) \leq 0 \\ \delta_{1,i}(k) - \delta_{1,i}(k-1) - \delta_{2,i}(k) \leq 0 \\ \delta_{1,i}(k) + \delta_{1,i}(k-1) + \delta_{2,i}(k) \leq 2 \end{cases} \quad (4)$$

于是命题③—⑤可转化为如下线性不等式组:

$$\begin{cases} t_i(k) \leq t_{\text{lock}}(1 - \delta_{2,i}(k)) \\ t_i(k) \geq 0 \\ t_i(k) \leq t_i(k-1) + 1 \\ t_i(k) \geq t_i(k-1) + 1 - t_{\text{lock}}\delta_{2,i}(k) \\ t_i(k) - t_{\text{lock}} \geq \varepsilon + (-t_{\text{lock}} - \varepsilon)(1 - \delta_{2,i}(k+1)) \end{cases} \quad (5)$$

式(1)、(2)、(4)和(5)构成了单台ACL的MLD模型,该模型不仅考虑了温度与闭锁时间约束,而且以数学方程组形式表示了ACL的信息物理耦合关系。ACL可基于MLD模型各自估计调节范围并准确响应控制信号,实现自治性。

## 1.3 调节范围估计

对于开关控制的第*i*台ACL,在一段时间内空调的平均功率与额定功率存在以下关系<sup>[6]</sup>:

$$P_{\text{avg},i} = \mu_{\text{duty},i} P_{\text{rate},i} \quad (6)$$

其中,  $P_{\text{avg},i}$  为平均功率;  $\mu_{\text{duty},i}$  为占空比, 即 ACL 开关状态  $\delta_i=1$  的时间占比;  $P_{\text{rate},i}$  为额定功率。

为了表示各 ACL 控制的灵活性, 需要估计各 ACL 在下个控制周期的功率可调节范围。调节范围定义为满足闭锁时间与用户舒适度要求的最大和最小平均功率。设第  $j$  个控制周期(第  $i$  台 ACL)的最大和最小平均功率分别为  $P_{\text{avg},ij}^{\text{max}}$  和  $P_{\text{avg},ij}^{\text{min}}$ , 显然  $P_{\text{avg},ij}^{\text{max}}$  和  $P_{\text{avg},ij}^{\text{min}}$  与占空比有关。以  $P_{\text{avg},ij}^{\text{max}}$  为例, 可通过求解如下整数规划问题确定:

$$\begin{cases} \max \lambda_p \\ \lambda_p = \frac{\sum_{k=1}^{\tau_c} \delta_{1,i}(j\tau_c + k)}{\tau_c} P_{\text{rate},i} \\ \text{s.t. 式(1)、(2)、(4)、(5)} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\tau_c$  为微网控制周期内空调的控制间隔数。

同理, 可估计各 ACL 的最小平均功率  $P_{\text{avg},ij}^{\text{min}}$ , 然后将调节范围上传给微网以参与协调控制。

## 2 ACL的自治控制方法

将具有自治运行能力的 ACL 聚集起来可以参与削峰、负荷跟踪等多种电力系统应用。考虑到未来大量具有随机性的可再生能源将通过微网接入电网, 提高微网联络线功率的可计划性具有重要价值, 故本文以跟踪微网联络线功率计划值为算例验证所提方法。

### 2.1 微网联络线功率计划值跟踪

微网系统中包含可再生能源、各类可控和不可控负荷<sup>[16-17]</sup>。本文中可再生能源只考虑风电, 可控负荷只考虑 ACL。

设风电功率为  $P_w$ ; 微网中 ACL 和不可控负荷的功率分别为  $P_{\text{ac}}$  和  $P_l$ ; 联络线功率为  $P_g$ , 并设定当  $P_g$  为正时表示微网从外网购买电量, 为负时表示微网向外网出售电量。则功率平衡关系满足:

$$P_g = P_l + P_{\text{ac}} - P_w \quad (8)$$

设定日前对第  $j$  个控制周期的风电功率、ACL 自由功率以及不可控负荷功率进行预测, 结果分别为  $P_w^{\text{da}}$ 、 $P_{\text{ac},j}^{\text{da}}$  和  $P_{l,j}^{\text{da}}$ , 则日前联络线功率的计划值  $P_{g,j}^{\text{da,sch}}$  为:

$$P_{g,j}^{\text{da,sch}} = P_{l,j}^{\text{da}} + P_{\text{ac},j}^{\text{da}} - P_w^{\text{da}} \quad (9)$$

由于风电和负荷的日前预测误差较大, 实际联络线功率与计划值存在较大偏差。为此, 日内对风电、不可控负荷的预测值进行修正, 修正结果分别记为  $P_w^{\text{intra}}$  和  $P_{l,j}^{\text{intra}}$ 。为了尽可能地跟踪日前联络线功率计划值, 微网需发挥空调集群的灵活性, 则将其总功率调整为:

$$\tilde{P}_{\text{ac},j}^{\text{target}} = P_{g,j}^{\text{da,sch}} - P_{l,j}^{\text{intra}} + P_w^{\text{intra}} \quad (10)$$

其中,  $\tilde{P}_{\text{ac},j}^{\text{target}}$  为空调集群期望目标功率。

为了保证舒适性, 空调集群的调节能力有限。由于各 ACL 能够估计并上报调节能力, 利用式(11)

可以方便地计算聚合后的微网空调集群调节能力:

$$\begin{cases} P_{\text{avg},j}^{\text{max}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{avg},ij}^{\text{max}} \\ P_{\text{avg},j}^{\text{min}} = \sum_{i=1}^N P_{\text{avg},ij}^{\text{min}} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $P_{\text{avg},j}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{avg},j}^{\text{min}}$  分别为第  $j$  个周期内空调集群的最大和最小平均功率;  $N$  为参与控制的空调数量。

则空调集群的实际目标功率为:

$$P_{\text{ac},j}^{\text{target}} = \begin{cases} P_{\text{avg},j}^{\text{min}} & \tilde{P}_{\text{ac},j}^{\text{target}} < P_{\text{avg},j}^{\text{min}} \\ P_{\text{avg},j}^{\text{max}} & \tilde{P}_{\text{ac},j}^{\text{target}} > P_{\text{avg},j}^{\text{max}} \\ \tilde{P}_{\text{ac},j}^{\text{target}} & P_{\text{avg},j}^{\text{min}} \leq \tilde{P}_{\text{ac},j}^{\text{target}} \leq P_{\text{avg},j}^{\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $P_{\text{ac},j}^{\text{target}}$  为实际目标功率。

为了减少微网层与负荷层之间的通信量, 本文引入统一控制信号  $\pi_j$ , 该信号定义为:

$$\pi_j = \frac{P_{\text{ac},j}^{\text{target}} - P_{\text{avg},j}^{\text{min}}}{P_{\text{avg},j}^{\text{max}} - P_{\text{avg},j}^{\text{min}}} \quad (13)$$

显然  $\pi_j \in [0, 1]$ 。该控制信号适应于所有受控空调, 无需做单独控制, 故可以广播形式发送至集群内。

### 2.2 ACL的最优开关序列

各 ACL 在接收到控制信号  $\pi_j$  后, 基于其自身的调节范围计算所需承担的目标功率:

$$P_{\text{ac},ij}^{\text{target}} = \pi_j (P_{\text{avg},ij}^{\text{max}} - P_{\text{avg},ij}^{\text{min}}) + P_{\text{avg},ij}^{\text{min}} \quad (14)$$

其中,  $P_{\text{ac},ij}^{\text{target}}$  为第  $i$  台 ACL 在本周期的目标功率。

根据式(6)所示的空调平均功率与占空比的关系, 为满足目标功率, 空调在控制周期内的开启时间应为:

$$\tau_{\text{on},ij} = \text{round}(\tau_c P_{\text{ac},ij}^{\text{target}} / P_{\text{rate},i}) \quad (15)$$

其中,  $\text{round}(\cdot)$  为四舍五入函数。

如果集群内所有空调都在每个控制周期的初始时刻开启, 则会出现同步现象而导致负荷尖峰。对此采用如下处理方法: 令每台空调在受控前独立产生一个在  $[0, \tau_c - 1]$  范围内均匀分布的随机整数, 作为其在每个控制周期内的偏移时间  $t_s$ 。这相当于将集群内的空调分为  $\tau_c$  组, 每组相隔 1 min 开启, 如图 2 所示。

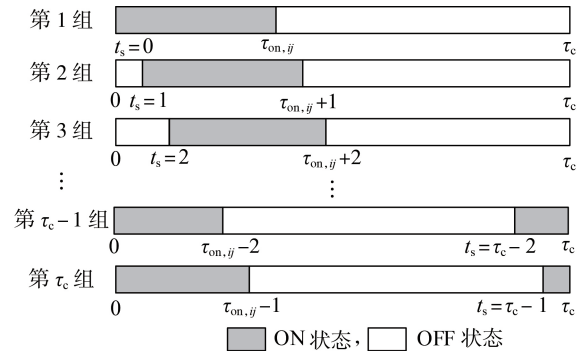


图2 各组空调的参考开关序列

Fig.2 Reference ON/OFF sequences of ACLs in different groups

则根据偏移时间  $t_s$  和开启时间  $\tau_{on,ij}$ , 各空调即可产生参考开关序列, 该序列维持了集群内的负荷状态多样性, 并保证了 ACL 所需承担的目标功率, 但并未考虑闭锁时间和舒适度要求。为此, 各空调以其 MLD 模型为约束条件, 通过求解式(16)所示的最优化问题将上述参考开关序列修正为可行开关序列。

$$\begin{cases} \min_{\delta_{1,i}} \sum_{k=1}^{\tau_c} (\delta_{1,ij}(k) - \delta_{0,ij}(k))^2 \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^{\tau_c} \delta_{1,ij}(k) = \tau_{on,ij} \\ \text{式(1)、(2)、(4)、(5)} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\delta_{0,ij}$  为参考序列;  $\delta_{1,ij}$  为可行序列。

显然, 该优化问题属于混合整数二次规划问题。分支定界法被很多学者认为是求解混合整数二次规划问题最有效的方法<sup>[15]</sup>, 故本文采用该求解算法。

### 2.3 总体控制框架

根据上文, ACL 与微网只需每隔长度为  $\tau_c$  的控制周期通信一次, 完整控制过程如图3所示。具体过程为: ①首先在日前预测风电功率、不可控负荷以及空调集群自由状态功率, 由式(9)得到联络线功率计划值  $P_{g,j}^{da,sch}$ ; ②在日内第  $j$  个周期开始前, 由各空调上传第  $j$  个周期的调节范围, 同时微网控制中心预测第  $j$  个周期的风电功率以及不可控负荷功率, 并根据式(12)得到集群目标功率, 计算出统一控制信号  $\pi_j$ ; ③各 ACL 按照式(14)各自确定目标功率, 并根据式(16)确定可行开关序列, 实现自治控制; ④下一个控制周期重复步骤②和③, 直至当日结束。

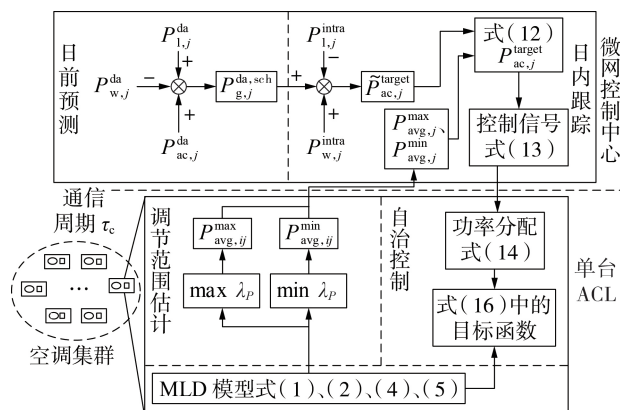


图3 空调自治控制框架

Fig.3 Autonomous control framework of ACLs

### 2.4 与其他方法的比较

由上文可见, ACL 的自治控制是本文方法的关键特点, 这使得本文方法与现有典型方法存在如下不同: ①与温度设定值控制<sup>[18]</sup>等直接负荷控制方法相比, 本文方法并不开放设备直接控制权, 有利于保证设备安全; ②与状态序列<sup>[3]</sup>等精确负荷控制方法相比, 本文方法中微网和 ACL 之间不需要频繁通信

(例如文献[3]中通信时间为 1 min) 以获取负荷状态和发送控制命令, 控制代价较小; ③与基于模型的集中式控制<sup>[7-10]</sup>相比, 本文方法中微网层无需收集负荷的模型参数和用户偏好, 能够保证用户隐私, 且不会因聚合模型过于复杂而难以求解。

## 3 仿真算例

### 3.1 参数设置

本文考察某社区微网系统, 社区中共有 1000 台 ACL 参与控制, ACL 的额定功率和热参数模型参照文献[13]。空调闭锁时间均设置为 3 min, 各 ACL 的室温上、下限分别在 (27, 28)℃ 和 (22, 23)℃ 范围内随机产生, 初始室温及开关状态也随机产生。

设社区中有一座装机容量为 1500 kW 的风电场, 风能渗透率(风机装机容量与年负荷峰值的比值)为 0.3<sup>[16]</sup>。风电功率、不可控负荷日前预测误差设置为 15%。根据预测误差随预测时长增大的特点, 日内预测误差设置为 5%~7.5%。上述误差均指的是绝对值平均误差。夏季某日的日前负荷和风电功率的预测值如图4所示<sup>[19]</sup>。

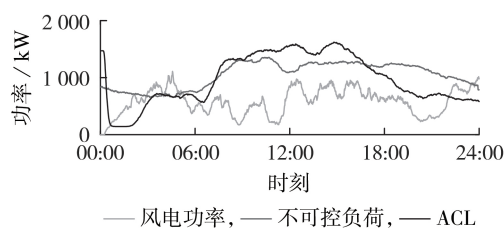


图4 日前负荷和风电功率预测值

Fig.4 Day-ahead forecasting values of loads and wind power

取  $\tau_c=30$ , 即微网控制周期为 30 min, 仿真时长为 1 d。

### 3.2 ACL 自治控制效果

#### 3.2.1 跟踪效果

日前联络线功率计划值以及 ACL 受控前后的联络线功率如图5所示。由图可知, 当 ACL 不参与

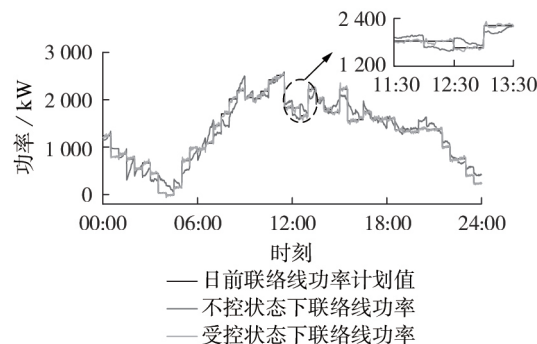


图5 日前联络线功率计划值以及日内联络线功率

Fig.5 Day-ahead schedule power and intra-day power of tie-line

控制时,由于日前预测误差较大,日内联络线功率会与计划值存在明显偏差。而ACL参与控制显著提高了联络线功率的跟踪效果。此外,跟踪过程中基本没有产生负荷尖峰。

### 3.2.2 跟踪精度

为了衡量空调集群跟踪精度,设跟踪误差 $e$ 为:

$$e = \frac{|\text{实际功率} - \text{实际目标功率}|}{\text{实际目标功率}} \times 100\% \quad (17)$$

则各控制周期的平均跟踪误差如图6所示。由图6可知,12:00附近的跟踪误差要小于其他时刻,这是因为12:00附近空调集群的目标功率较高,由式(17)可知,跟踪误差较小。

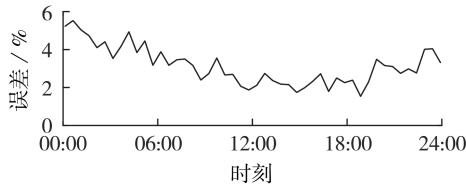


图6 跟踪误差均值

Fig.6 Average tracking error

### 3.2.3 室温变化

由于各ACL存在个性化的温度范围设置,故对室温进行归一化处理:

$$T_{\text{norm},i} = \frac{T_{a,i} - T_{\min,i}}{T_{\max,i} - T_{\min,i}} \quad (18)$$

空调集群的归一化温度变化 $T_{\text{norm},i}$ 如附录中图A1所示。由图可知,室内温度皆未越限,这验证了MLD模型中式(2)所示室温约束发挥了作用。

### 3.2.4 闭锁时间

集群内空调开启或关闭状态的持续时间均不少于3 min,其具体分布如图7所示,由图可见MLD模型中式(5)所示闭锁时间约束被完全满足。

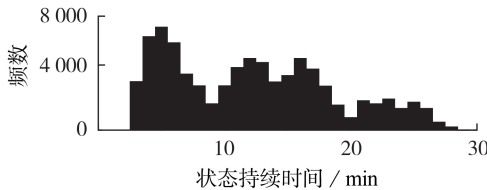


图7 空调开关状态持续时间分布

Fig.7 Distribution of ACLs' ON/OFF state duration

### 3.2.5 ACL序列偏差

为了观察参考序列与可行序列的偏差,定义第 $i$ 台ACL在一天内所有控制周期的序列偏差量为:

$$\beta_i = \sum_{k=1}^{1440} |\delta_{0,i}(k) - \delta_{1,i}(k)| \quad (19)$$

图8为一天内ACL序列偏差量分布。由图8可知,序列 $\delta_{0,i}(k)$ 、 $\delta_{1,i}(k)$ 基本保持一致,一天中的偏差

量不超过30次,即平均每个控制周期只有大约1次偏差。

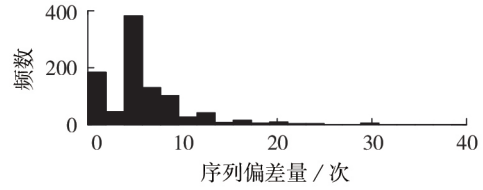


图8 一天内空调集群序列偏差量分布

Fig.8 Distribution of ACLs' sequences deviation in one day

图9以第25组中某一ACL为例,给出了参考序列与可行序列的直观比较。由图可见,在07:00附近序列出现了偏差,这是因为按照参考序列,该ACL应在06:55—06:59和07:00—07:01以及07:25—07:30时段开启,但该序列不满足闭锁时间约束。于是经过式(16)修正后,可行序列保证了闭锁时间约束,同时维持了相同的占空比。

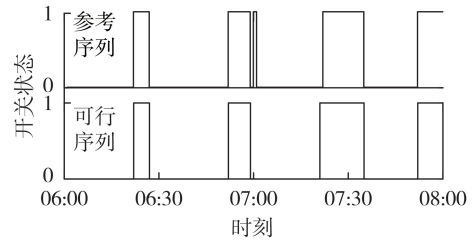


图9 参考序列与可行序列

Fig.9 Reference sequence and feasible sequence

### 3.2.6 计算时间

本文仿真所用的计算机采用Inter Core i5-6200U@2.30 GHz处理器、4 GB随机存取存储器(RAM)、64位操作系统。仿真软件采用MATLAB,优化工具为MATLAB中的yalmip工具箱。在每个控制周期内,负荷层面每台空调的分布式优化时长(式(7)和式(16)的仿真时长)为0.779 8 s,而微网层的控制时长(式(11)—(14)的仿真时长)为0.281 7 s,均远小于30 min的控制周期,说明本文方法具有足够的实时性,且即使面对大规模空调也具有良好的可扩展性。

## 4 结论

本文首先建立了单台ACL的MLD模型,实现了ACL物理动态与控制逻辑及其耦合关系的完整数学描述。基于该MLD模型,ACL能够自行计算调节灵活性并响应微网的控制信号。由于ACL具有自治性,其无需上传模型参数和用户偏好,能够保护数据隐私并提高设备安全性;然后通过聚合ACL的灵活性来补偿日前风电功率和负荷估计误差,从而提高了

微网联络线功率的可计划性。利用ACL的自治性,微网无需建立复杂的控制模型,有利于协调大规模ACL;同时,微网与ACL之间无需频繁通信,能够有效降低通信成本。

### 致 谢

本文受到国家电网公司科技项目(电网信息物理系统分析与控制的基础理论与方法(国家项目配套))的资助。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 肖斐,艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):184-190.  
XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(5):184-190.
- [2] 杨瑾,石坤,杨建林,等. 考虑平抑风电波动的空调冷水机组群控策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):108-113.  
YANG Jin, SHI Kun, YANG Jianlin, et al. Group control strategy of air conditioning water chiller considering smoothing wind power fluctuations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(7):108-113.
- [3] 施金晓,黄文焘,邵能灵,等. 计及群控电热泵的微网联络线功率平滑策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):201-208.  
SHI Jinxiao, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Microgrid tie-line power smoothing strategy considering group control of electric heat pumps [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):201-208.
- [4] 卫文婷,王丹,贾宏杰,等. 一种基于模型预测的城市园区分布式温控负荷需求响应控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2049-2056.  
WEI Wenting, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A hierarchical and distributed control strategy of thermostatically controlled appliances for city park based on load model prediction [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(8):2049-2056.
- [5] FACCHINETTI T, DELLA V M. Real-time modeling for direct load control in cyber-physical power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011,7(4):689-698.
- [6] ASWANI A, MASTER N, TANEJA J, et al. Reducing transient and steady state electricity consumption in HVAC using learning-based model-predictive control [J]. Proceedings of the IEEE, 2012,100(1):240-253.
- [7] 王云,刘东,李庆生. 主动配电网中柔性负荷的混合系统建模与控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2142-2150.  
WANG Yun, LIU Dong, LI Qingsheng. Modeling and control of flexible load based on hybrid system in active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(8):2142-2150.
- [8] WANG Yun, LIU Dong, SUN Chen. A cyber physical model based on a hybrid system for flexible load control in an active distribution network [J]. Energies, 2017,10(3):267.
- [9] PARISIO A, RIKOS E, GLIELMO L. A model predictive control approach to microgrid operation optimization [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014,22(5):1813-1827.
- [10] CHEN Guanhong, YAN Lixia, LIU Dong. Mixed logical dynamic based optimal control model for user side integrated energy system [J]. Energy Procedia, 2019,158:2671-2676.
- [11] MATHIEU J, KOCH S, CALLAWAY D. State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(1):430-440.
- [12] ZHANG W, LIAN J, CHANG C, et al. Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(4):4655-4664.
- [13] 姚焱,张沛超. 基于市场控制的空调负荷参与平抑微网联络线功率波动的方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):782-791.  
YAO Yao, ZHANG Peichao. A market-based control method for air conditioner loads to smooth microgrid tie-line power fluctuation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(3):782-791.
- [14] GOTSEFF P, LUNDSTROM B. Data-driven residential load modeling and validation in GridLAB-D [C] // Green Technologies Conference. Denver, Co, USA: IEEE, 2017:20-25.
- [15] BEMPORAD A, MORARI M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints [J]. Automatica, 1999,35(3):407-427.
- [16] 陈昭宇,王丹,贾宏杰,等. 基于连续状态变量约束的微网虚拟储能系统最优平抑控制策略[J]. 电网技术,2017,41(1):55-63.  
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Optimal smoothing control strategy of virtual energy storage system in microgrid based on continuous state constraints [J]. Power System Technology, 2017,41(1):55-63.
- [17] 陈丽丽,牟龙华,许旭峰,等. 储能装置运行策略及运行特性对微电网可靠性的影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):70-76.  
CHEN Lili, MOU Longhua, XU Xufeng, et al. Influences of energy storage operational strategy and characteristic on microgrid reliability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(7):70-76.
- [18] 艾欣,赵国群,周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1596-1603.  
AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(6):1596-1603.
- [19] 张建新,李中豪,张沛超. 基于MPC的风燃协调滚动调度运行策略[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(22):18-23.  
ZHANG Jianxin, LI Zhonghao, ZHANG Peichao. A MPC-based rolling dispatch strategy of the wind-gas coordinated system [J]. Power System Protection and Control, 2016,44(22):18-23.

### 作者简介:



王永权

王永权(1995—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要研究方向为信息物理系统、需求侧负荷控制等(E-mail: wyq\_sjtu@163.com);

张沛超(1970—),男,江苏连云港人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制、可再生能源接入、能源互联网等(E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn);

姚焱(1993—),女,上海人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网、可再生能源接入等(E-mail: missxinyu1215@sjtu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Mixed logical dynamic modeling and autonomous control method for ACLs

WANG Yongquan,ZHANG Peichao,YAO Yao

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education,  
Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

**Abstract:** Random renewable energy connected to microgrid reduces the controllability and schedule ability of the tie-line power. Aggregating flexibility of large-scale ACLs (Air Conditioning Loads) can solve this problem effectively. Firstly, single ACL is modeled by using the MLD (Mixed Logical Dynamic) method, and then solves the ON/OFF sequence autonomously to respond to a control signal based on the MLD model. Secondly, the flexibility of ACL population is used to correct day-ahead forecasting errors of renewable energies and loads in the microgrid, which improves the tracking accuracy of the microgrid for the day-ahead schedule power of tie-line. Finally, simulations are carried out on a microgrid case with 1 000 ACLs. The simulative results show that the proposed method can aggregate the flexibility of a large scale of autonomous ACLs to improve the schedule ability of the tie-line power in microgrid, while effectively ensuring users' comfort and device safety.

**Key words:** microgrid; ACL; cyber-physical system; MLD; autonomous control; day-ahead schedule of tie-line

(上接第 96 页 continued from page 96)

## Optimal operating strategy of distribution network based on coordination of electric vehicle and distributed energy resource considering current protection

MEI Zhe<sup>1</sup>,ZHAN Hongxia<sup>1</sup>,YANG Xiaohua<sup>2</sup>,DENG Qiang<sup>1</sup>,ZHANG Hao<sup>1</sup>,ZHU Jinlong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. State Grid Yunyang Power Supply Company of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404500, China)

**Abstract:** To ensure proper action of protection and reduce the influence of disordered charging of EV (Electric Vehicle) and fluctuation of DER (Distributed Energy Resource), an optimal operating strategy is proposed. This strategy is based on the coordination of EV and DER considering current protection. To improve the efficiency of solution, the cluster control strategy is adopted in EVs. This model is built without changing the original protection schemes based on information fusion nodes. Standard deviation of load and cost of EV owners are considered as objectives. Combined explicit and implicit indexes of current protection with voltage indicators, the optimal scale of EV access to the distribution network is assessed. The optimal operating states can be obtained by the coordination of EV and DER on the optimal scale. To conform to reality better, the states are amended by model predictive control. The proposed strategy is proved to ensure benefit of owners and proper action of protection anytime during optimal cycle by case analysis in three scenarios. And the strategy is also proved to maintain voltage at normal range, stabilize load fluctuation, decrease load level and reduce network losses.

**Key words:** distribution network; electric vehicles; distributed energy resources; current protection; cluster control; optimal operating states

## 附录

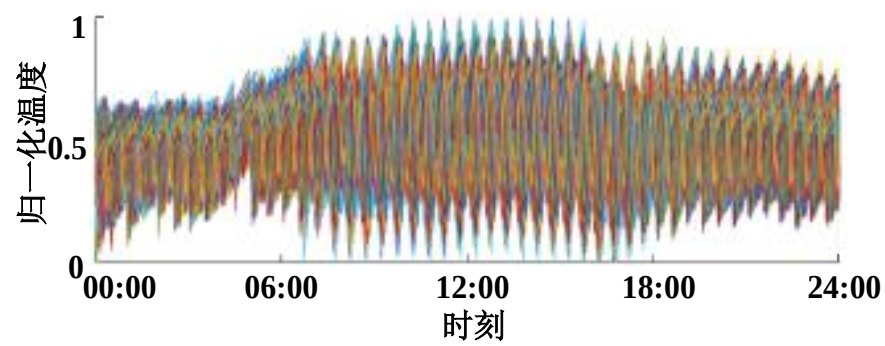


图 A1 归一化室内温度变化曲线

Fig.A1 Normalized indoor air-temperature profile