

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240750

# 异质空调负荷参与多区域电力系统频率调节的协同控制策略

刘彦伶, 武志刚, 赖翔, 许丹阳

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 用户侧海量的空调负荷被认为是电力系统重要的调频储备资源之一。通过聚合海量的空调负荷资源, 可以为电力系统提供调频服务, 改善系统频率调节能力。因此, 提出了一种定频空调、变频空调协同参与调频的控制策略。基于两种空调不同的负荷特性, 定频空调集群模拟涡轮机调速器的下垂控制, 在检测到系统频率偏离额定值时, 开启或关闭一定数量的设备来改变集群的运行功率以参与系统频率调节。变频空调集群采用比例-积分控制, 通过调节空调压缩机的运行频率从而连续调节集群功率来参与调频。在此基础上, 分别将两种空调集群的调频模型推广至互联多区域电力系统。同时以区域间的联络线偏差和区域内的频率偏差作为反馈控制信号, 进一步优化了空调负荷调节策略。最后, 相关仿真结果验证了所提协同控制策略的有效性。

**关键词:** 定频空调; 变频空调; 多区域电力系统; 频率调节

## Cooperative control strategy for heterogeneous air-conditioning loads participating in frequency regulation of multi-area power systems

LIU Yanling, WU Zhigang, LAI Xiang, XU Danyang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The massive air-conditioning loads on the customer side are considered one of the important frequency regulation reserve resources for the power system. By aggregating these air-conditioning load resources, frequency regulation services can be provided to a power system to improve system frequency regulation capability. Therefore, a control strategy for the coordinated participation of fixed-frequency air-conditioners (FFAC) and inverter air-conditioners (IAC) in frequency regulation is proposed. Based on the different load characteristics of the two types of air conditioners, a FFAC cluster simulates the droop control of the turbine governor. When a deviation from the nominal system frequency is detected, a certain number of devices are turned on or off to change the FFAC cluster's operating power and participate in frequency regulation. The IAC cluster adopts the proportional-integral control to continuously adjust the cluster's power by adjusting the operating frequency of the air conditioning compressors to participate in frequency regulation. On this basis, the frequency regulation models of the two types of air-conditioning clusters are extended to interconnected multi-area power systems. The inter-area tie-line deviation and intra-area frequency deviation are used as feedback control signals to further optimize the air-conditioning loads regulation strategy. Finally, simulation results verify the effectiveness of the proposed coordinated control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B6007).

**Key words:** fixed-frequency air-conditioner (FFAC); inverter air-conditioner (IAC); multi-area power system; frequency regulation

## 0 引言

“双碳”目标下<sup>[1]</sup>, 可再生能源渗透率不断增

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(U22B6007); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(YNKJXM20222400)

加<sup>[2-3]</sup>, 系统整体惯量下降<sup>[4]</sup>, 导致备用容量匮乏, 电力系统频率安全问题日益凸显。可再生能源发电固有的随机性、波动性加剧了电力系统发-用电供需平衡难度, 亟待挖掘更多灵活性资源以协调高比例可再生能源电力系统的经济、安全运行。

需求侧响应通过整合负荷侧资源向系统提供多

种辅助服务,是保障电力系统安全、经济运行的重要手段<sup>[5]</sup>。以空调、冰箱、热水器等为代表的温控负荷,具有负荷整体体量大、控制灵活、热储能特性等特点<sup>[6-7]</sup>,是提供电力系统调频服务的理想对象。近年来,通过需求响应手段对数量众多的空调进行有效控制以提供调频服务引起了广泛关注<sup>[5]</sup>。

对空调的控制策略可分为集中控制、分散控制和混合控制<sup>[5]</sup>。在集中式控制策略中,控制中心测量系统频率偏差,确定负荷增减量,并直接向响应负荷发送控制信号,作为响应负荷的空调负荷通常通过切换开关状态<sup>[8-9]</sup>或者调整温度设定值<sup>[10-11]</sup>两种方法来实现该控制模式。这种方式能够确保信息的及时处理和指令的准确下发,具有较高的控制精度,但对通信速度和安全性的要求也相对较高,随着可参与设备的海量涌入,传统的集中控制方式难以继<sup>[12]</sup>。

分散控制将控制权下放至本地控制端,负荷的控制决策过程通常在本地端完成。该控制方法大大降低了对通信的要求,但可靠性和精度不高。在已有的分散控制中,文献[13]提出的分散控制方法允许通过随机控制精确调制大量设备的总功耗,但此方法对于建模物理量的准确度要求较高,不利于推广。文献[14]考虑用户舒适度以及避免负荷同时响应,开发了一种分散式动态控制算法,但该方法忽略了负荷参与响应的公平性。文献[15]通过若干空调集群参与一次频率调节且不产生功率回弹,但在控制过程中缺乏对控制偏差的考虑。

混合控制结合了集中控制与分散控制的特点,总体而言呈现“集中参数—分散决策”的形式。文献[16]考虑用户响应的意愿,提出新型的中央空调集群双层优化控制模型,实现自身利益的最大化。文献[17]构建了基于市场机制的分层控制框架,控制温控负荷参与快速调频服务,上层由虚拟机对各聚合商进行协调分组,下层由社区集中器对受控负荷进行逐级聚合,大大减少了控制成本。

此前的研究在制定空调参与电力系统调频控制策略方面做出了一定的贡献,但仍存在一些问题。

首先,基于不同种类负荷参与频率调节过程的研究较少。研究通常只关注一种类型的频率调节过程,例如仅关注二次调频<sup>[18]</sup>或仅关注一次调频<sup>[19-20]</sup>;在可控负荷方面,大多数研究也局限于单一类型负荷<sup>[17,21-22]</sup>,使得空调的调节潜力没有得到充分利用。其次,在当前关于负荷柔性调控的方法中,负荷所处的电力系统普遍被等效为单区域系统,针对多区域电力系统场景下可调节负荷参与调频服务的控制策略研究较少<sup>[23]</sup>。

针对上述问题,本文提出了一种协调异质空调的混合控制策略来解决上述问题,主要贡献如下。

1) 提出了一种协调定频空调和变频空调参与系统调频的控制策略,充分利用了两类空调不同的负荷特性,有效调动了需求侧空调负荷的调节潜力。

2) 提出了定频与变频空调协调参与频率调节的多区域电力系统频率响应模型,同时考虑系统频率偏差和联络线功率偏差对调频控制策略的影响。

## 1 空调参与调频协调控制策略总体结构

家庭常见的温控负荷主要有电热水器、空调以及冰箱。鉴于冰箱的单个功率相对较小,研究通常聚焦于电热水器与空调<sup>[24]</sup>。其中,空调负荷在夏日负荷高峰时所占峰荷比例高达30%~40%<sup>[25]</sup>,同时,电热水器表现出全年运行稳定、功率特性良好等特点<sup>[26]</sup>。基于这些特性,温控负荷参与需求侧响应可有效解决新型电力系统中调频资源短缺的问题<sup>[20]</sup>,设计合理的温控负荷控制策略可有效改善电力系统的频率响应能力<sup>[27]</sup>。

本文提出的协调控制框架包含系统控制中心、负荷聚合商(load aggregator, LA)、定频空调(fixed-frequency air-conditioning, FFAC)集群和变频空调(inverter air-conditioning, IAC)集群。通常来说,温控负荷通过 LA 聚合,以负荷集群的形式向电力系统提供辅助服务<sup>[5]</sup>。其中 LA 在系统控制中心和提供调频服务的中小型空调机组之间发挥着中介作用。本文假设每台空调设备都配备了能够测量频率、接受相关指令和执行对应操作的处理器,并且所有空调设备都工作在制冷模式下。图1为所提协调控制策略的总体结构。具体来说,参与需求响应的用户通过签订合同,响应电力系统需求信号,并从中获得收益。根据需求响应计划的不同,这里的 LA 可以是配电网运营商、负荷集群中心等。系统控制中心从各 LA 处获得 FFAC 集群和 IAC 集群的运行状态信息和频率备用,并向 LA 发送相应控制信号。

当监测到系统因受到扰动而导致频率不断下降时,系统控制中心向 LA 发送调频信号,LA 则通过控制负荷集群,使空调集群参与系统的频率调节。其中,FFAC 集群通过模拟涡轮机调速器的频率下垂控制参与系统的频率调节;IAC 集群通过改变运行频率从而持续调整运行功率以参与频率调节。

为了简化管理,本文将控制结构简化为:系统控制中心—单个负荷聚合商—受控定频/变频空调负荷集群。

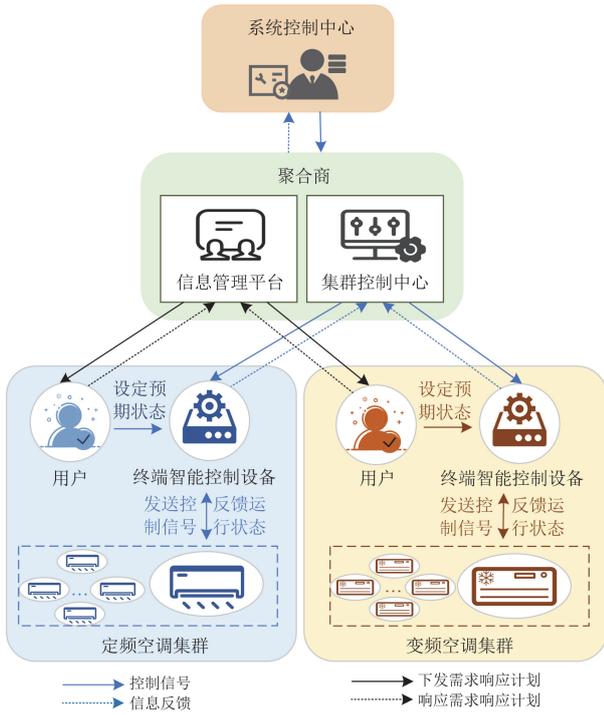


图1 空调负荷协调参与频率控制策略总体结构

Fig. 1 General structure of air-conditioning load cooperative frequency control strategy

## 2 典型空调负荷建模

### 2.1 空调负荷热力学模型

空调的运行特性与对应建筑/房间的热量变化紧密相关<sup>[28]</sup>。本文采用等效热参数(equivalent thermal parameters, ETP)模型来描述空调房间温度的动态变化规律。为了简化计算,本文忽略日照强度、人类行为活动的影响,建立空调房间的热量传导模型<sup>[29]</sup>,表示为

$$M_{\text{air}} \rho_{\text{air}} V \frac{dT_{\text{in}}(t)}{dt} = Q_{\text{gain}}(t) - Q_{\text{ac}}(t) \quad (1)$$

式中:  $M_{\text{air}}$  和  $\rho_{\text{air}}$  分别为空气比热容和空气密度;  $V$  为房间体积;  $T_{\text{in}}$  为室内温度;  $Q_{\text{gain}}$  和  $Q_{\text{ac}}$  分别为单位时间内房间增加的热量和空调整冷量。

空调机组的电热转换模型由空调负荷的类型决定。根据运行方式的不同可将空调负荷分为定频空调和变频空调两类,以下分别介绍两类空调的电力运行模型。

### 2.2 定频空调电力运行模型

定频空调可运行在开机(ON)和待机(OFF)两种状态<sup>[30]</sup>,其示意图如图2所示。当空调处于ON状态时,其运行在额定功率下;当空调处于OFF状态时,认为其运行功率为0。

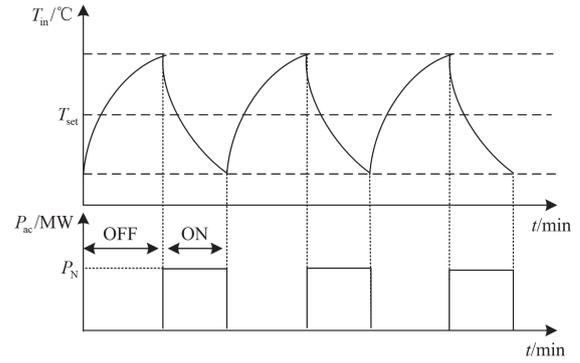


图2 定频空调的电力运行方式

Fig. 2 Power operation of a FFAC

图2中:  $T_{\text{set}}$  为用户预先设定的温度;  $P_{\text{ac}}$  为该空调的运行功率;  $P_{\text{N}}$  为该空调的额定功率。当房间的温度  $T_{\text{in}}$  达到或低于温度下限值  $T_{\text{set}} - T_{\text{DB}}$  时,空调处于待机(OFF)状态;当房间的温度  $T_{\text{in}}$  达到或高于温度上限值  $T_{\text{set}} + T_{\text{DB}}$  时,空调处于工作(ON)状态。 $s(t)$  是表示定频空调 ON/OFF 状态的 1/0 变量,且满足如式(2)所示的关系。

$$s(t) = \begin{cases} 1, & s(t - \Delta t) = 0 \text{ 且 } T_{\text{in}} \geq T_{\text{set}} + T_{\text{DB}} \\ 0, & s(t - \Delta t) = 1 \text{ 且 } T_{\text{in}} \leq T_{\text{set}} - T_{\text{DB}} \\ s(t - \Delta t), & T_{\text{set}} - T_{\text{DB}} < T_{\text{in}} < T_{\text{set}} + T_{\text{DB}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta t$  为调度时间间隔;  $T_{\text{DB}}$  为空调正常运行时恒温器死区。

基于定频空调的开关状态,可以计算出第  $k$  个定频空调消耗的功率  $P_{\text{FFAC},k}(t)$  为

$$P_{\text{FFAC},k}(t) = s_k(t) \cdot P_{\text{N}} \quad (3)$$

式中,  $s_k(t)$  为第  $k$  个空调的状态变量。

在单个定频空调的 ETP 模型基础上,通过累加可以得到定频空调集群的消耗功率为

$$P_{\text{FFAC}}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{FFAC}}} P_{\text{FFAC},k}(t) \quad (4)$$

式中:  $N_{\text{FFAC}}$  表示定频空调集群中的空调数量;

$P_{\text{FFAC}}(t)$  为  $t$  时刻定频空调集群的消耗功率。

### 2.3 变频空调电力运行模型

变频空调 IAC 通过改变压缩机的频率控制电功率,可以实现功率的连续平滑控制。其中,压缩机的频率  $f_{\text{IAC}}$  与电功率  $P_{\text{IAC}}$ 、制冷量  $Q_{\text{IAC}}$  之间的关系可表示为<sup>[23]</sup>

$$\begin{cases} P_{\text{IAC}}(t) = k_{\text{p}} f_{\text{IAC}}(t) + \mu_{\text{p}} \\ Q_{\text{IAC}}(t) = k_{\text{q}} f_{\text{IAC}}(t) + \mu_{\text{q}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $k_{\text{p}}$ 、 $k_{\text{q}}$ 、 $\mu_{\text{p}}$  和  $\mu_{\text{q}}$  分别为 IAC 对应的常系数;

$f_{IAC}$  为 IAC 的压缩机运行频率, 其被控制在以下规定的范围内, 表示为

$$f_{IAC}^{\min} \leq f_{IAC} \leq f_{IAC}^{\max} \quad (6)$$

式中,  $f_{IAC}^{\min}$ 、 $f_{IAC}^{\max}$  分别表示 IAC 压缩机运行频率的最小值和最大值。

### 3 空调负荷频率调节控制策略

#### 3.1 系统频率响应动态过程

电力系统的频率响应动态过程是指正常运行的电力系统因切机、负荷增减、直流闭锁等暂态事件而产生有功不平衡量, 从而引起系统频率从稳态过渡到新的稳态或失稳的过程。

以系统频率跌落情况为例(如图 3 所示), 当系统受到有功扰动  $\Delta P_L$  时(即  $t_0$  时刻), 功率平衡状态被打破, 系统频率发生动态变化<sup>[31]</sup>。首先是惯性响应阶段, 同步机基于惯性自发释放旋转动能, 频率开始下降, 频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)在  $t_0$  时刻达到最大值。随后, 当频率偏差达到调频死区阈值时, 一次调频资源开始响应, 进入一次调频阶段。当一次调频功率等于功率缺额时, 即  $t_1$  时刻, 频率达到最低点( $f_{nadir}$ ), 频率偏差达到最大( $\Delta f_{max}$ )。在此之后, 调频资源将继续输出一一次调频功率。从能量的角度来看, 发电机转子在  $t_1$  之后吸收一次调频过程释放的能量从而使频率抬升, 直至一次调频功率再次等于  $\Delta P_L$ , 即  $t_2$  时刻频率偏差达到准稳态( $\Delta f_{qss}$ )。至此, 一次调频结束。为使系统频率恢复至额定值, 自动发电控制(automatic generation control, AGC)动作以调整二次调频资源输出, 使系统频率恢复到额定水平, 即  $t_3$  时刻。

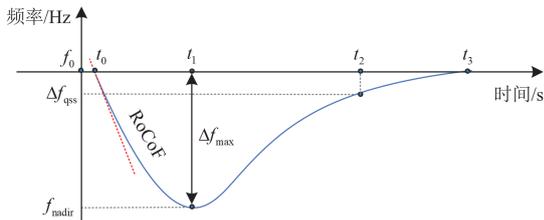


图 3 电力系统频率下降的动态响应过程

Fig. 3 Dynamic response process of power system frequency decline

空调设备通过需求响应机制聚合参与电力系统的频率调节, 为系统提供辅助服务; 一方面扩展了系统的调频资源, 充分挖掘了需求侧资源的潜力; 同时, 空调负荷相比传统发电机具备更快速的调节能力, 利用空调设备的快速响应特性, 有助于改善

电力系统的频率响应性能, 推动能源系统的高效和可持续发展。

#### 3.2 定频空调集群调频策略

发电机跳闸、负荷扰动等情况会导致频率下降 ( $\Delta f < 0$ )。频率跌落较为严重时, 定频空调通过模拟涡轮机调速器的频率下垂控制参与频率调节, 定频空调负荷集群参与调频的响应曲线如图 4 所示。

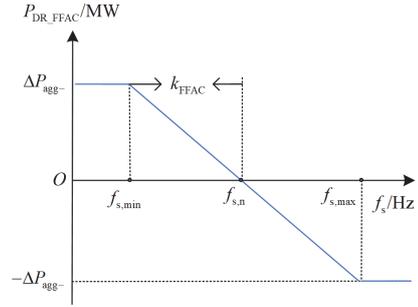


图 4 FFAC 集群的虚拟下垂曲线

Fig. 4 Virtual droop curve of FFAC aggregation

令  $P_{DR\_FFAC}(f_s)$  表示系统频率为  $f_s$  时 FFAC 集群提供的调节功率, 计算公式为

$$P_{DR\_FFAC}(f_s) = \begin{cases} \Delta P_{agg-} & f_s(t) \leq f_{s,min} \\ -k_{FFAC}(f_s(t) - f_{s,n}) & f_{s,min} < f_s(t) < f_{s,max} \\ -\Delta P_{agg-} & f_{s,max} \leq f_s(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$k_{FFAC} = \frac{\Delta P_{agg-}}{f_{s,n} - f_{s,min}} \quad (8)$$

式中:  $f_s(t)$  为  $t$  时刻的系统频率;  $k_{FFAC}$  为 FFAC 集群的等效下垂系数;  $f_{s,max}$ 、 $f_{s,min}$  分别为响应系统频率的上、下限;  $f_{s,n}$  为系统频率额定值(50 Hz);  $\Delta P_{agg-}$  为 FFAC 集群向下调节的最大可调容量, 见图 5。图 5 呈现了定频空调的聚合功率曲线, 阐释了 FFAC 集群在向上和向下调节过程中最大可调容量的概念。

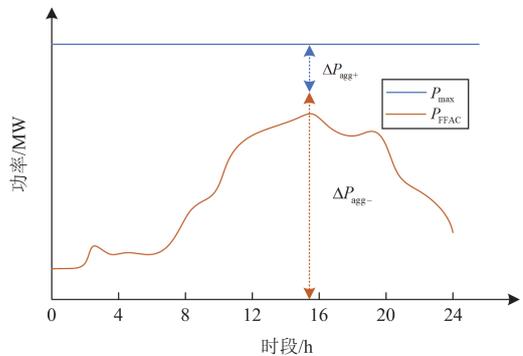


图 5 定频空调聚合功率曲线

Fig. 5 Aggregate power curve of FFACs

基于式(7), FFAC 集群参与系统频率调节的具体步骤如下。

步骤 1: 当  $f_{s,\min} < f_s < f_{s,\max}$  时, 在每个时间步, 系统控制中心计算当前的负荷响应功率  $\Delta P_{DR\_FFAC}$ , 具体为连续两个时间步的目标负荷响应功率之间的差值。

步骤 2: 当控制中心计算出  $\Delta P_{DR\_FFAC}$  后, 将信息  $\Delta P_{DR\_FFAC}$  发送给 LA, LA 立即向其管控的负荷集群中处于“ON”状态的 FFAC 发送控制信号, 每台 FFAC 则以指定的概率  $p_{off}$  关断。

当 FFAC 收到控制信号时, 产生一个 0~1 之间的随机数  $r$ , 并与  $p_{off}$  进行比较, 其开/关规律如式(9)所示。

$$\begin{cases} r \leq p_{off} & \text{ON} \rightarrow \text{OFF} \\ r > p_{off} & \text{保持ON} \end{cases} \quad (9)$$

$$p_{off} = \min\left(\frac{\Delta P_{DR\_FFAC}}{\Delta P_{agg-}}, 1\right) \quad (10)$$

式中,  $p_{off}$  为定频空调参与需求响应的控制概率。

当处于“ON”状态的 FFAC 控制器接收到“OFF”信号时, 将关闭设备。因为 FFAC 根据均匀分布的随机值做出“开/关决策”, 所以其温度仍然服从均匀分布。

### 3.3 变频空调集群调频策略

相较于传统定频空调受限于开关控制模式, 变频空调的最大特点在于其安装有整流器和逆变器, 从而可实现压缩机转速的连续可调, 进而提供更长时间范围的调节能力, 且调节更加灵活<sup>[32]</sup>。本节介绍 IAC 集群参与系统频率调节的控制策略。

基于拉普拉斯变换, 空调负荷的热力学模型可转换为频域表达形式, 如式(11)所示。

$$M_{air} \rho_{air} V \cdot T_{in}(s) = Q_{gain}(s) - Q_{IAC}(s) \quad (11)$$

式中,  $Q_{gain}(s)$  表示房间增加的热量, 其来自于室内和室外空气之间的热传递, 可以描述为<sup>[29]</sup>

$$Q_{gain}(s) = U_{out-in} [T_{out}(s) - T_{in}(s)] \quad (12)$$

式中:  $U_{out-in}$  为室外空气和室内空气之间的等效热导率;  $T_{out}$  表示室外环境温度。

从 2.3 节中 IAC 的电力运行模型可知, IAC 在不参与频率调节的情况下, 其控制目标是保持室内温度与设定的温度相同。基于此, IAC 的压缩机频率控制目标可通过式(13)的比例积分(PI)控制器来实现。

$$\Delta f_{IAC}(t) = \xi \Delta T_{dev}(t) + \eta \cdot \int \Delta T_{dev}(t) dt = \xi (\Delta T_{in}(t) - \Delta T_{set}(t)) + \eta \cdot \int (\Delta T_{in}(t) - \Delta T_{set}(t)) dt \quad (13)$$

式中:  $\Delta f_{IAC}(t)$  为 IAC 的压缩机运行频率变化量;  $\xi$  和  $\eta$  分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数;  $\Delta T_{dev}(t)$  为室内温度与用户设定温度之间的温度偏差;  $\Delta T_{in}(t)$  为室内温度变化量;  $\Delta T_{set}(t)$  为用户设定温度的变化量。

为了利用变频空调参与系统的调频服务, 其运行功率与运行频率应根据系统频率变化进行调整。系统控制中心会向变频空调集群提供系统频率变化信号  $\omega_{IAC}(t)$  以进行变频空调运行功率的调节。故式(13)可以改写为

$$\Delta f_{IAC}(t) = \omega_{IAC}(t) + \xi \Delta T_{dev}(t) + \eta \cdot \int \Delta T_{dev}(t) dt \quad (14)$$

由式(14)可知, IAC 的运行频率变化受到 IAC 的设定温度变化  $\Delta T_{set}$  和系统频率变化信号  $\omega_{IAC}(t)$  这两个外界因素的影响。由于 IAC 应在短时间内进行控制, 因此可以假设 IAC 的设定温度在该时间段内保持不变, 即  $\Delta T_{set}(t) = 0$ 。故室内温度与设定温度的偏差  $\Delta T_{dev}(t)$  可改写为

$$\Delta T_{dev}(t) = \Delta T_{in}(t) - \Delta T_{set}(t) = \Delta T_{in}(t) \quad (15)$$

因此, 在 IAC 参与频率调节的过程中, 其运行频率变化仅受电力系统控制信号  $\omega_{IAC}(t)$  这一外界输入信号的影响。

$$\Delta f_{IAC}(t) = \omega_{IAC}(t) + \xi \Delta T_{in}(t) + \eta \int \Delta T_{in}(t) dt \quad (16)$$

结合变频空调的电力运行模型式(5)和运行频率变化的计算公式(式(16)), 第  $k$  台 IAC 响应系统频率调节信号的运行功率变化可表示为

$$\Delta P_{IAC,k}(t) = k_p \Delta f_{IAC,k}(t) \quad (17)$$

式中:  $\Delta P_{IAC,k}(t)$  为第  $k$  台 IAC 在  $t$  时刻的功率变化量;  $\Delta f_{IAC,k}(t)$  为第  $k$  台 IAC 在  $t$  时刻的压缩机运行频率变化量。IAC 运行频率的变化要满足相应的约束条件式(6)。通过累加多个变频空调对应的式(17)可以得到变频空调集群参与频率调节所提供的聚合功率为

$$\Delta P_{IAC}(t) = \sum_{k=1}^{N_{IAC}} \Delta P_{IAC,k}(t) \quad (18)$$

式中:  $\Delta P_{IAC}(t)$  为  $t$  时刻 IAC 集群的功率变化量;  $N_{IAC}$  表示 IAC 集群中的空调数量。

此外, 为了减少对用户舒适度的影响, 需要将室内温度控制在可接受的范围内。

$$|\Delta T_{in}| \leq \Delta T_{in}^{\max} \quad (19)$$

式中:  $|\Delta T_{in}|$  为室内温度变化量;  $\Delta T_{in}^{\max}$  为满足用户

舒适度的室内温度变化量的最大值。

#### 4 多区域异质空调负荷动态控制策略

本文所提定频空调集群及变频空调集群参与系统频率调节的控制策略都仅针对单区域系统的情况。随着电力系统互联不断增加,多区域电力系统更为常见。不同区域系统之间通过功率联络线传输功率,当某区域发生扰动时,不仅会造成该区域的频率偏差,由功率联络线引起的功率波动还会影响其他区域的频率变化。事实上,单区域内参与系统频率调节的温控负荷的数量相对有限,为了能够充分利用可调的温控负荷资源,可利用其他区域的温控负荷调频资源参与本区域的系统频率调节,从而提高资源利用效率。

为此,本节提出考虑异质空调负荷调频动态响应的多区域调频控制策略。具体来说,通过使定频、变频空调集群协同参与系统调节,实现考虑联络线功率偏差信号的大规模负荷控制,提高多区域电力系统的频率动态响应性能。

##### 4.1 多区域定频空调集群调频策略

所提利用定频空调参与系统频率调节的控制策略仅以本区域的频率偏差作为控制信号,而没有考虑多区域系统中联络线功率偏差的影响,本节针对该问题做进一步改进。

当多区域电力系统中的区域*i*受到扰动后,FFAC 集群提供的调节功率计算公式(7)修正为<sup>[33]</sup>

$$P_{DR\_FFACi}(f_i) = \begin{cases} \Delta P_{aggj-} & f_i(t) \leq f_{i,min} \\ -k_{FFAC,i}(f_i(t) - f_{i,n}) - L_i \sum_{\substack{j \in N_{area} \\ i \neq j}} \Delta P_{tie,i-j} & f_{i,min} < f_i(t) < f_{i,max} \\ -\Delta P_{aggj-} & f_{i,max} \leq f_i(t) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{DR\_FFACi}(f_i)$  为区域*i*中 FFAC 集群的响应功率;  $\Delta P_{tie,i-j}$  为区域*i*和区域*j*之间的联络线功率偏差;  $f_i(t)$  为区域*i*在*t*时刻的频率;  $f_{i,n}$  为区域*i*的频率额定值(50 Hz);  $f_{i,max}$ 、 $f_{i,min}$  分别为区域*i*响应系统频率的上、下限;  $k_{FFAC,i}$  为区域*i*中 FFAC 集群的等效下垂系数;  $L_i$  为区域*i*预定义的系数;  $N_{area}$  表示多区域系统中区域的数量;  $\Delta P_{aggj-}$  为区域*i*中 FFAC 集群的向下调节的最大可调容量。式(20)中的第一项和第二项( $f_{i,min} < f_i(t) < f_{i,max}$  条件下)分别代表频率偏差及联络线功率偏差的反馈作用。相应控制框图如图 6 所示。

##### 4.2 多区域变频空调集群调频策略

在多区域电力系统中,变频空调 IAC 的运行功

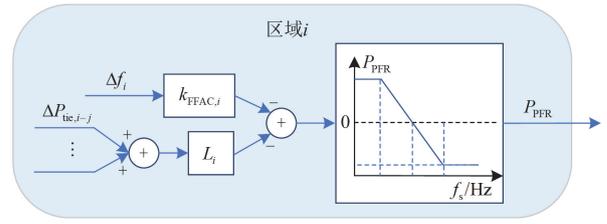


图 6 多区域电力系统中定频空调控制策略

Fig. 6 Control strategy of FFACs in multi-area power systems

率和运行频率需要根据系统区域控制误差(area control error, ACE)信号进行调整。因此,式(16)可以改写为<sup>[19]</sup>

$$\Delta f_{IAC}(t) = \xi \Delta T_{in}(t) + \eta \int \Delta T_{in}(t) dt + \Delta \phi_i(t) + \beta \int \Delta \phi_i(t) dt \quad (21)$$

式中:  $\Delta \phi_i(t)$  表示区域*i*的 ACE 信号;  $\beta$  表示区域控制误差的积分控制系数。

ACE 作为多区域电力系统中的一个重要参数,是控制系统频率和区域间传输功率的关键指标<sup>[20]</sup>。其可由频率偏差和联络线功率偏差计算得到。

$$\Delta \phi_i(t) = \delta_i \Delta f_i(t) + \gamma_i \Delta P_{tie,i}(t) \quad (22)$$

式中:  $\Delta f_i(t)$  和  $\Delta P_{tie,i}(t)$  分别为区域*i*的系统频率偏差及联络线功率偏差;  $\delta_i$  和  $\gamma_i$  分别为二者对应的比例系数。

联络线功率偏差反映了系统中非本区域的负荷和发电功率的波动情况,具体的计算公式为<sup>[19]</sup>

$$\Delta P_{tie,i}(t) = \sum_{\substack{i,j \in N_{area} \\ i \neq j}} \Delta P_{tie,i-j}(t) = 2\pi \sum_{\substack{i,j \in N_{area} \\ i \neq j}} T_{i-j} \int (\Delta f_i(t) - \Delta f_j(t)) dt \quad (23)$$

式中:  $T_{i-j}$  为区域*i*和区域*j*之间的联络线时间常数<sup>[34]</sup>;  $\Delta f_j(t)$  为区域*j*的系统频率偏差。

一般来说,各个区域的基准容量并不相同,  $\Delta P_{tie,i-j}$  对于区域*i*和区域*j*而言也是不同的。为此,需要用容量转化系数来处理不同区域之间不同的基准容量。

$$k_{i-j} = -\frac{P_{base,i}}{P_{base,j}} \quad (24)$$

式中:  $k_{i-j}$  为区域*i*和区域*j*之间的容量转化系数;  $P_{base,i}$  和  $P_{base,j}$  分别为区域*i*和区域*j*的基准容量。因此,当各个区域的基准容量并不相同时,联络线功率偏差的计算公式为

$$\Delta P_{tie,i}(t) = \sum_{\substack{i,j \in N_{area} \\ i \neq j}} \Delta P_{tie,i-j}(t) = 2\pi \sum_{\substack{i,j \in N_{area} \\ i \neq j}} k_{i-j} \cdot T_{i-j} \int (\Delta f_i(t) - \Delta f_j(t)) dt \quad (25)$$

由此, 多区域电力系统中变频空调集群参与频率调节的控制框图如图 7 所示。

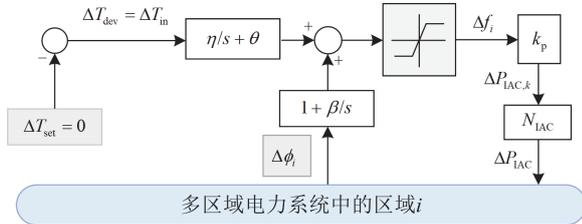


图 7 多区域电力系统中变频空调集群控制方法  
Fig. 7 Control of IACs in multi-area power systems

### 4.3 协同考虑定频空调和变频空调参与调频的多区域电力系统模型

基于上述分析, 定频空调集群和变频空调集群协同参与频率调节的多区域电力系统模型中单个区域的频率调节模型如图 8 所示。图 8 中:  $\Delta P_{L,i}$  表示区域  $i$  受到的扰动功率;  $\Delta P_{G,i}$  表示区域  $i$  中发电机组提供的调节功率;  $\Delta P_{DR,i}$  为区域  $i$  中由定频空调集群和变频空调集群共同提供的调节功率。

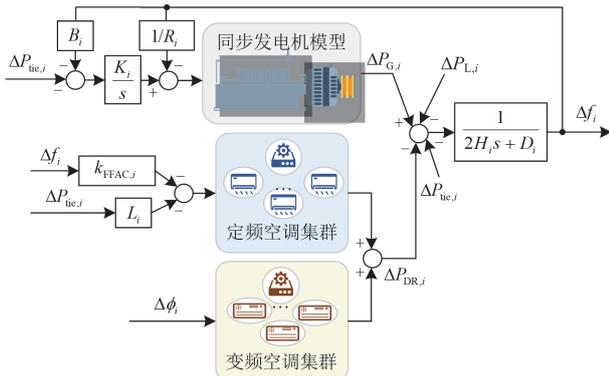


图 8 多区域系统频率调节框图

Fig. 8 Block diagram of frequency regulation in multi-area system

## 5 算例分析

仿真系统采用两区域电力系统, 在 Matlab R2023b 的 Simulink 平台中搭建, 如图 9 所示。电力系统额定频率为 50 Hz, 系统各参数取值见文献[29, 33]。

为了验证本文所提协同控制策略的有效性, 本文设置了以下 4 种场景进行仿真分析。

场景 1: 仅发电机参与调频。

场景 2: 定频空调参与系统频率控制, 调频功率由发电机、定频空调共同承担。

场景 3: 变频空调参与系统频率控制, 调频功率由发电机、变频空调共同承担。

场景 4(本文所提策略): 定频、变频空调协同参与系统频率控制, 调频功率由发电机、定频空调和

变频空调共同承担。

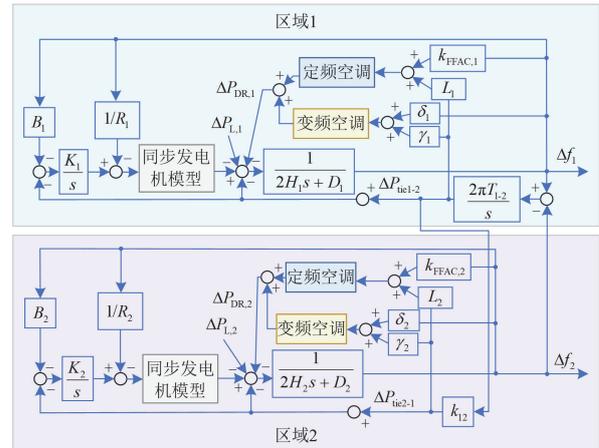


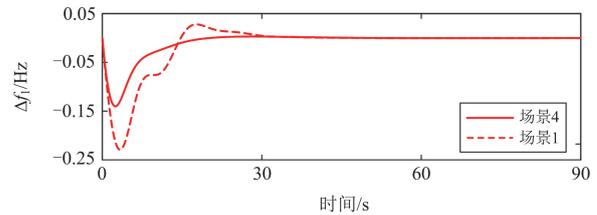
图 9 两区域仿真系统

Fig. 9 Multi-area simulation system

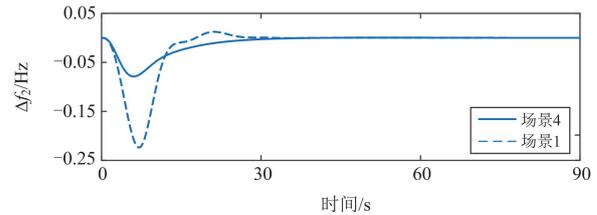
### 5.1 空调协调控制策略有效性验证

#### 5.1.1 空调参与调频效果验证

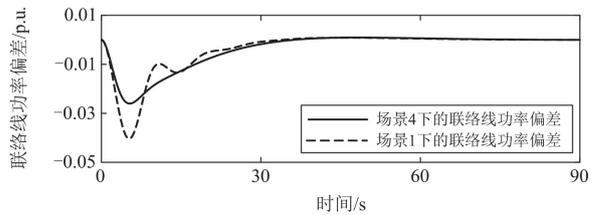
定义  $\Delta f_i(t)$  为区域  $i$  频率偏差, 其与  $f_{i,n}$  及  $f_i(t)$  的关系为  $\Delta f_i(t) = f_i(t) - f_{i,n}$ 。在区域 1 中考虑 5% ( $\Delta P_{L,1} = 0.05$  p.u.) 的阶跃扰动, 仿真结果如图 10 所示。



(a) 区域 1 的频率偏差对比



(b) 区域 2 的频率偏差对比



(c) 区域的联络线功率偏差对比

图 10 不同场景下区域频率偏差与联络线功率偏差

Fig. 10 Changes of area frequency deviation and tie-line power flow for different scenarios

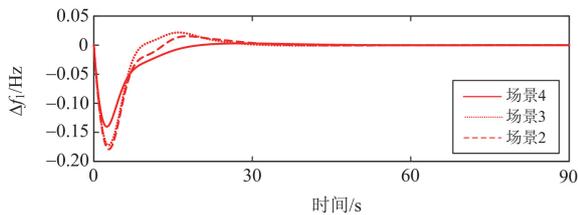
1) 从图 10(a)可以看出,在区域 1 中,空调不参与调频时,最大频率偏差为 $-0.229\text{ Hz}$ 、出现时间为 $4.301\text{ s}$ 。相比之下,空调参与调频后,区域 1 的最大频率偏差为 $-0.1402\text{ Hz}$ 、出现时间为 $2.455\text{ s}$ ;类似地,从图 10(b)可得,有、无空调参与调频下区域 2 中最大频率偏差分别为 $-0.0788\text{ Hz}$ 、 $-0.2238\text{ Hz}$ 。说明空调与发电机共同参与系统频率控制(本文所提策略)的情况下频率偏差更小。其主要原因是空调能够比发电机更快地提供调节功率,从而使全系统有功功率不平衡量在短时间内迅速减小。因此,空调能够极大地改善系统的调频能力。同时,本文所提协同 FFAC 和 IAC 调频策略在调频过程中出现的超调现象更加轻微,恢复过程较场景 1 也更为平滑,证明了协调控制策略的有效性。

2) 从图 10(c)可知,与场景 1 相比,空调与发电机共同提供调频功率,能够提高联络线功率的平抑速度,并显著降低联络线最大功率偏差。说明空调可以为电力系统提供运行备用,有助于减小联络线功率偏差、改善联络线功率波动。

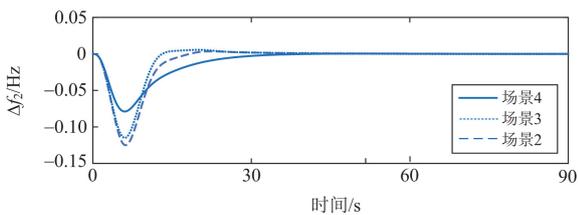
### 5.1.2 异质空调协同参与调频效果验证

在区域 1 中考虑  $5\%$  ( $\Delta P_{L1} = 0.05\text{ p.u.}$ ) 的阶跃扰动,仿真结果如图 11 所示。为验证不同种类的空调集群在本文控制策略下共同参与调频的效果,比较定频空调、变频空调共同参与调频与两者单独参与调频的系统频率偏差。

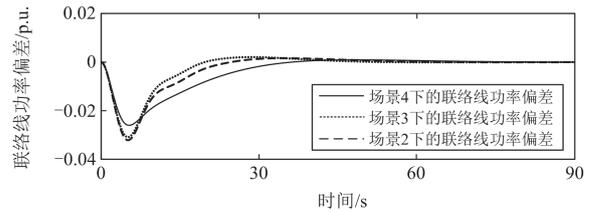
如图 11(a)所示,区域 1 中 FFAC 与 IAC 共同参与调频时最大频率偏差为 $-0.1402\text{ Hz}$ ,两种空调各自单独参与调频时的最大频率偏差分别为 $-0.1791\text{ Hz}$ 与 $-0.1721\text{ Hz}$ ,即 FFAC 和 IAC 共同参与调频可更好地削减频率偏差量。类似地,由图 11(b)可知,区域 2 中 FFAC 和 IAC 共同参与调频时最大频率偏差比仅有 FFAC 参与调频时少了  $36.9\%$ ;与仅有 IAC



(a) 区域1的频率偏差对比



(b) 区域2的频率偏差对比



(c) 不同场景下区域的联络线功率偏差对比

图 11 异质空调协同参与调频效果

Fig. 11 Effect of heterogeneous air conditioners participating in frequency regulation

参与调频时相比,最大频率偏差少了  $31.5\%$ 。由此可知,定频与变频共同参与调频时系统频率恢复的速度更快,恢复时间更短,频率超调的情况更加轻微。此外,由图 11(c)可知,3 种情况下区域的联络线功率偏差分别为  $0.026\text{ p.u.}$ 、 $0.032\text{ p.u.}$  和  $0.031\text{ p.u.}$ ,亦即定频与变频共同参与调频时联络线功率偏差最小,能够有效平抑联络线波动。由此可知,协调定频空调和变频空调两类负荷参与调频,可提高系统的频率调节性能,也可以充分利用两类柔性负荷的灵活性,调动更多的需求侧灵活性资源。

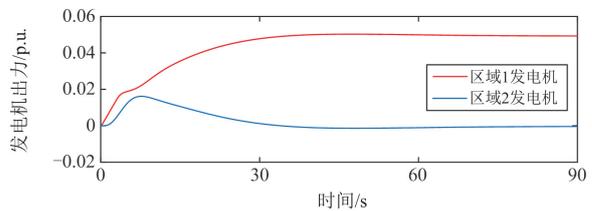
## 5.2 多区域电力系统协调控制策略有效性验证

### 5.2.1 多区域空调协同参与调频效果验证

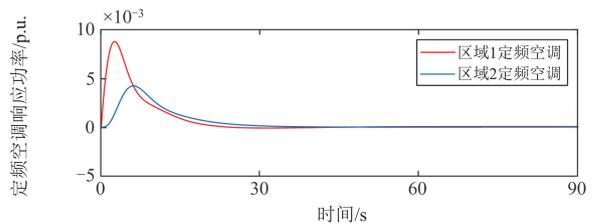
假设区域 1 发生  $5\%$  ( $\Delta P_{L1} = 0.05\text{ p.u.}$ ) 的阶跃扰动,此时各区域的发电机和空调将改变运行状态以提供调节功率。仿真结果如图 12 所示。

图 12(a)显示了两个区域中发电机的调节功率变化情况,可知当扰动发生时,区域内的发电机会增发功率,最终区域 1 的发电机将覆盖全部扰动量,非扰动发生区域(即区域 2)的发电机将在频率调节结束后恢复到初始运行状态。

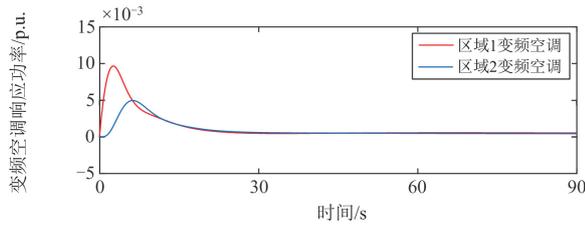
从图 12(b)可知,区域 1 受到扰动后,区域 1 内的 FFAC 和 IAC 均快速降低运行功率,与发电机



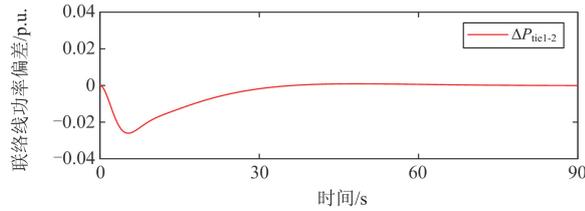
(a) 两区域发电机出力情况



(b) 两区域定频空调响应情况



(c) 两区域变频空调响应情况



(d) 两区域联络线功率偏差变化

图 12 空调参与调频仿真情况

Fig. 12 Simulation of air conditioners participating in frequency regulation

协同实现调频功率的供给。同时, 通过对比图 12(a)一图 12(c)可以看出, 相比于发电机, 空调的响应速度更快, 能够作为快速调频资源支撑系统的频率调节, 以减小系统频率偏差。此外, 在图 12(a)和图 12(c)中, 区域 1 受到扰动时, 区域 2 的发电机增发功率, 区域 2 的定频、变频空调降低运行功率, 向扰动功率区域提供调节功率。

无论是 FFAC 还是 IAC, 都主要在前 40 s 内提供调节服务, 并在电力系统恢复稳定状态后逐步退出。因此, 空调参与电力系统频率调节对用户舒适度的影响较小。

图 12(d)显示了当扰动功率发生在区域 1 时联络线功率的偏差。 $\Delta P_{tie1-2}$  为负值, 表明调节功率从区域 2 流向区域 1; 说明非扰动区域向扰动区域提供调节功率, 协助多区域电力系统恢复平衡。

### 5.2.2 多区域调频策略与单区域调频策略效果对比

为了对比多区域调频控制策略与单区域调频控制策略的效果, 本节设置如下。

1) 多区域系统的仿真设置与 5.2.1 节中一致, 假设区域 1 发生 5% ( $\Delta P_{L1} = 0.05$  p.u.) 的阶跃扰动; 调频功率由发电机、定频空调和变频空调集群承担。

2) 单区域系统的各参数取值与多区域系统的参数设置一致。假设单区域系统发生 5% ( $\Delta P_{L1} = 0.05$  p.u.) 的阶跃扰动; 调频功率由发电机、定频空调和变频空调集群承担。

多区域调频策略与单区域调频策略效果对比如图 13 所示。

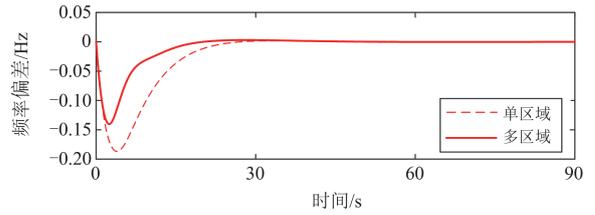


图 13 多区域与单区域的调频策略效果对比

Fig. 13 Comparison of the frequency regulation strategies between multi-area and single-area systems

由图 13 可知, 单区域协调控制策略和多区域协调控制策略在相同的功率扰动下, 系统的最大频率偏差分别为  $-0.1867$  Hz、 $-0.1402$  Hz, 即多区域协调控制策略能够更好地削减频率偏差量。此外, 由图 13 可以看出, 两种情况下频率最低点出现时间分别为  $3.922$  s 和  $2.455$  s, 说明多区域频率控制策略下系统频率的恢复速度更快。由此可知, 与单区域的调频控制策略相比, 多区域协调负荷调频控制策略能够更好地利用非扰动区域的资源改善系统的调频能力。

## 6 结语

本文提出了一种异质空调负荷参与多区域电力系统频率调节的协同控制策略。以多机两区域的仿真系统进行算例分析, 得到的结论如下。

1) 采用两种类型的空调集群参与频率调节, 通过仿真对比了有无空调参与调频时系统频率偏差的变化。仿真结果表明, 空调的调节惯性比传统发电机组小, 能更快地实现动态响应; 利用空调参与系统的频率调节服务, 能够有效减小系统的频率偏差, 提高频率的恢复速度, 增强系统的调频能力。同时, 协调两类空调参与频率调节, 增加了可用频率储备, 能更好地处理电力供需不匹配问题。

2) 提出了一种适用于多区域电力系统频率控制的需求响应控制策略, 分析系统频率偏差和联络线功率偏差对调频控制策略的影响。由仿真可知, 非扰动区域可以向扰动区域提供调节功率, 协助多区域电力系统恢复平衡。

本文所提控制策略基于负荷集群与控制中心之间的双向通信, 后续将进一步研究通信延迟给整体控制性能带来的影响。

## 参考文献

- [1] 胡志勇, 郭雪丽, 王爽, 等. 考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 109-119.

HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand

- response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 109-119.
- [2] 姚宇, 叶承晋, 朱超, 等. 考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(2): 34-45.  
YAO Yu, YE Chengjin, ZHU Chao, et al. Data-driven frequency constrained economic dispatch considering fast demand resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 34-45.
- [3] 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.
- [4] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(3): 855-868.  
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 855-868.
- [5] 姜婷玉, 李亚平, 江叶峰, 等. 温控负荷提供电力系统辅助服务的关键技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(11): 191-207.  
JIANG Tingyu, LI Yaping, JIANG Yefeng, et al. Review on key technologies for providing auxiliary services to power system by thermostatically controlled loads[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(11): 191-207.
- [6] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 考虑采暖建筑用户热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同的电热联合系统优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(9): 124-135.  
ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering the coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(9): 124-135.
- [7] 戴剑丰, 阎诚, 汤奕. 基于分布式通信架构的温控负荷参与电力系统频率调控模型[J]. *电网技术*, 2023, 47(5): 1810-1821.  
DAI Jianfeng, YAN Cheng, TANG Yi. Model of temperature control load participating in frequency regulation of power system based on distributed communication architecture[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(5): 1810-1818.
- [8] PENG W, DI W, KARANJIT K. Flexibility estimation and control of thermostatically controlled loads with lock time for regulation service[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 3221-3230.
- [9] 刘志伟, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 计及电气特性的空调负荷建模及集群控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(1): 178-184, 192.  
LIU Zhiwei, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Air conditioning load modeling and cluster control strategy considering electrical characteristic[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(1): 178-184, 192.
- [10] 姜婷玉, 鞠平, 王冲. 考虑用户调节行为随机性的空调负荷聚合功率模型[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(3): 105-113.  
JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong. Aggregated power model of air-conditioning load considering stochastic adjustment behaviors of consumers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(3): 105-113.
- [11] 李滨, 黎智能, 陈碧云. 电力市场中配电网的空调群调控策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(15): 124-131.  
LI Bin, LI Zhineng, CHEN Biyun. Air conditioning group dispatch control strategy of distribution network in electricity market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 124-131.
- [12] SUN Y, CAI Z, GUO C, et al. Collaborative dynamic task allocation with demand response in cloud-assisted multi-edge system for smart grids[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(4): 3112-3124.
- [13] TINDEMANS H S, TROVATO V, STRBAC G. Decentralized control of thermostatic loads for flexible demand response[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(5): 1685-1700.
- [14] MUHSSIN M T, CIPCIGAN L M, JENKINS N, et al. Dynamic frequency response from controlled domestic heat pumps[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 4948-4957.
- [15] LI Z, WU W, ZHANG B. Coordinated state-estimation method for air-conditioning loads to provide primary frequency regulation service[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(13): 3381-3388.
- [16] 王丹, 兰宇, 贾宏杰, 等. 基于弹性温度可调裕度的中央空调集群需求响应双层优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22): 118-126, 134.  
WANG Dan, LAN Yu, JIA Hongjie, et al. Double-layer optimization strategy of cluster central air-conditioner demand response based on elastic temperature adjustable margin[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22): 118-126, 134.
- [17] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.

- YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- [18] HU J, CAO J, GUERRERO J M, et al. Improving frequency stability based on distributed control of multiple load aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1553-1567.
- [19] WU Xiaoyu, HE Jinghan, XU Yin, et al. Hierarchical control of residential HVAC units for primary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3844-3856.
- [20] 聂世豪, 李桐, 陈磊, 等. 投切型温控负荷一次调频策略及电网侧聚合建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊 1): 1-11.
- NIE Shihao, LI Tong, CHEN Lei, et al. Primary frequency control strategy of switching thermostatically controlled load and modeling of aggregated model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 1-11.
- [21] 刘广生, 李成鑫, 侯治吉, 等. 计及用户舒适度的空调负荷可调节能力评估及响应策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 58-66.
- LIU Guangsheng, LI Chengxin, HOU Zhiji, et al. Evaluation of adjustable capacity and response strategy for air-conditioning load considering comfort of customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 58-66.
- [22] 姚垚, 张沛超. 大规模变频空调参与电力系统辅助服务的协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 127-134.
- YAO Yao, ZHANG Peichao. Coordinated control method for ancillary services of power system with participation of large-scale inverter air-conditioner[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 127-134.
- [23] HUI H, DING Y, LIN Z, et al. Capacity allocation and optimal control of inverter air conditioners considering area control error in multi-area power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 332-345.
- [24] 柳阳. 基于电热水器负荷的电力系统调频控制策略研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- LIU Yang. Research on frequency control strategy of power system based on electric water heater load[D]. Qingdao: Qingdao University, 2021.
- [25] 王栋. 参与电网快速调频的变频空调负荷虚拟同步机调控技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- WANG Dong. Research on regulation technology of inverter air conditioning load virtual synchronous machine for fast grid frequency modulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [26] 杨秀, 卢炜, 余文昶, 等. 智能小区居民负荷参与优化调度及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 22-34.
- YANG Xiu, LU Wei, YU Wenchang, et al. Optimal dispatching and control strategies for residential load of intelligent communities[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 22-34.
- [27] SHI Q, LI F, LIU G, et al. Thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand profile and progressive recovery[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6259-6270.
- [28] 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.
- [29] 惠红勋. 温控负荷参与电力系统动态响应的建模与控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- HUI Hongxun. Research on modeling and control method of temperature control load participating in dynamic response of power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [30] 姚垚. 基于市场机制的温控负荷的控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- YAO Yao. Market-based control of thermostatically controlled loads[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [31] ZHANG Z, DU E, TENG F, et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [32] Bijli Bachao. What is inverter technology AC[EB/OL]. <https://www.bijlibachao.com>, 2017.
- [33] BAO Y, LI Y, WANG B, et al. Demand response for frequency control of multi-area power system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 20-29.
- [34] BEVRANI, HASSAN. Robust power system frequency control[M]. New York: Springer, 2014.

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-09-03

作者简介:

刘彦伶(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为柔性负荷调度控制; E-mail: 18277439091@163.com

武志刚(1975—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统数值仿真技术、复杂网络理论在电力系统中的应用、电力系统规划与运行等。E-mail: epzgwu@scut.edu.cn

(编辑 许威)