

虚拟电厂下灵活资源多时间尺度调频控制

莫理莉^{1,2}, 兰峻焜¹, 周亮³, 叶萌³, 马力³, 陈皓勇¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 华南理工大学建筑设计研究院有限公司, 广东省广州市 510640;
3. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东省广州市 510600)

摘要: 随着能源结构转型的推进,可再生能源的使用逐渐增加,仅依靠传统机组调节频率偏差难以满足需求。因此,为了解决此问题,考虑利用分布式资源(DR)参与调频辅助服务,DR主要考虑空调、电动汽车充电桩以及储能。首先,考虑了DR的特性和满意度评价方法;然后,基于状态势博弈理论对DR进行协调控制,将DR集中起来使其对外呈现为一个整体参与调频辅助服务;最后,通过算例仿真证明了该方案下对DR聚合并协调控制参与调频辅助服务的可行性和有效性,并对多时间尺度下储能、电动汽车充电桩以及可控负荷参与快速调频进行了验证。

关键词: 虚拟电厂; 分布式资源; 灵活资源; 协调控制; 多时间尺度控制; 调频辅助服务; 状态势博弈

0 引言

加快建设新型电力系统是“碳达峰·碳中和”行动方案的重点任务,其结构形态通过源-网-荷-储四要素体现^[1],使电网系统调控模式由传统的源随荷动转向源-网-荷-储一体化。为了响应“碳达峰”行动方案,中国政府及相关部门出台了支持建设虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的相关政策。VPP通过信息通信技术和软件系统,将分布式资源(distributed resources, DR)进行规模化聚合与调配^[2]。随着新能源发电占比提高^[3-6],其随机性、波动性以及不确定性加大了维持供电实时平衡的难度^[1]。传统火力发电机组退出导致系统阻尼和惯量减小,电网难以保证频率稳定。因此,建设VPP挖掘网侧和用户侧灵活资源调频潜力非常必要。

传统电力系统通过同步机组的一、二、三次调频维持频率稳定。VPP聚合多种灵活资源并实施集群协调控制,实现源-网-荷-储互动,保持供用电平衡和频率稳定^[7]。通过聚合不同响应特性的灵活资源可以参与系统一、二、三次调频:一次调频阶段,秒级乃至毫秒级响应时间的分布式储能参与快速调频^[8];二次调频阶段,分钟级的电动汽车充电桩和空调等DR参与可提高VPP的调频能力^[9-10];三次调频

阶段,众多灵活资源均可参与,优先选择经济性更好的资源,充分挖掘DR潜力,提高效率和经济效益。

近年来,VPP调频受到广泛关注,主要集中在资源调频潜力、响应特性、调频时长和调频控制策略等方面^[10-28]。调频潜力方面,文献[11-18]研究了空调、电动汽车和储能等资源的调频控制策略,表明这些资源可以有效参与VPP调频。文献[10,19-26]研究了空调、电动汽车和储能等资源的调频能力和响应特性,表明储能可作为一次调频资源,电动汽车充电桩和空调可作为二次调频资源,3种资源可共同作为三次调频资源。在调频策略方面,文献[27-30]采用遗传优化、粒子群和博弈等算法调节系统频率。文献[31]提出储能的多时间尺度调频策略,基本达到了与传统调频方式相同的调频效果,但储能调频成本较高,且存在防火和环保技术难点。

博弈论有助于优化资源利用和提高系统效益。势博弈具有分布式属性^[32],与VPP云网边端调度技术架构一致。状态势博弈引入了状态空间,能更好地处理主体间的耦合约束,具有较强的鲁棒性^[33]。文献[34-35]将状态势博弈引入电力系统中,验证了其有效性与应用价值。当调频对象为用户侧灵活资源时,利用状态势博弈策略对DR进行协调控制,能保证高效性,并仅需少量信息对设备进行调整^[35]。

综上,针对VPP调频策略的相关研究表明了VPP内部DR调频是可行且有效的。但是,在VPP中协同储能、电动汽车充电桩和空调等灵活资源的调频控制策略相关研究较少。本文旨在研究用户侧

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2024-02-06。

上网日期: 2024-08-15。

中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GDKJXM20220333)。

空调、电动汽车充电桩和分布式储能等DR参与一、二、三次调频的控制策略。首先,构建VPP参与调频辅助服务框架并分析其流程;其次,提出基于响应特性的聚合原则,建立基于状态势博弈的调频协调控制模型;然后,研究灵活资源参与和退出机制,在满足调频任务的前提下优化储能参与的深度和时间,减少储能容量,实现调频成本的降低,提高经济性;最后,通过算例仿真验证算法的有效性和经济性。

1 相关概念

1.1 运行框架

本文考虑的DR主要包括储能、电动汽车充电桩以及可控负荷等,其中,可控负荷主要是指空调。VPP参与调频辅助服务流程如图1所示。调度平台收集VPP内部DR信息,包括室内温度、电动汽车当前电量、充电挡位情况、储能的荷电状态等。这些信息经过处理、计算和预测,VPP整体上报调频容量给电网。调度平台接收到电网下发的调度指令后分解,将调频功率分配给储能、电动汽车充电桩及可控负荷等DR。

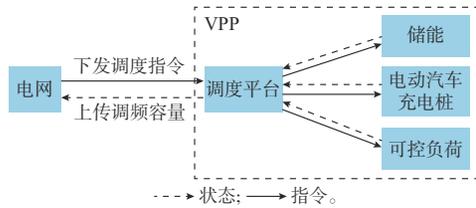


图1 VPP参与调频辅助服务
Fig. 1 VPP participating in frequency regulation ancillary services

1.2 调频机理

当系统频率偏差超出允许范围时,应对其进行调整,否则将会对电网造成影响。在VPP中,电动汽车充电桩、储能以及空调等DR通过电力电子变换器与电网连接,其并网逆变器通常采用下垂控制。VPP调频采用下垂控制具有诸多优点^[24],其控制过程如附录A图A1所示。

按照一、二、三次调频过程,分为3个阶段。第1阶段对应一次调频过程,采用快速响应性好的DR(储能)参与调频,迅速响应调度平台下发的指令以减小频率偏差;第2阶段对应二次调频过程,加入响应稍慢的DR(充电桩和空调)以增加系统调频能力;第3阶段对应三次调频过程,储能退出而充电桩和可控负荷继续参与调频服务,降低调频成本并保持系统频率在允许范围内。

储能、充电桩和空调参与调频过程如附录A图

A2所示,单位调节功率可表示为 $k=1/R=-\Delta P/\Delta f$,其中, k 为单位调节功率,反映了参与调频辅助服务的深度; R 为调差系数,是单位调节功率的倒数; Δf 为频率偏差; ΔP 为功率变化量。附录A图A2所示的过程中,频率偏差 Δf 在各DR的调频作用下逐渐减小。DR参与调频流程如图2所示。图中: T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别对应一次调频、二次调频和三次调频过程中的时间节点,其取值范围如表1所示。当频率超出允许范围时,储能将先全部参与调频,之后是响应速度较慢的空调和充电桩,从而增大系统整体的调频深度。当频率偏差达到上限时,为了能够降低调频成本,部分储能将会退出。当频率偏差未达到允许范围中间值附近时,储能对调频过程的贡献将会再次减少;否则,调频过程将会结束。当频率偏差再次超出允许范围时,会重新进入该调频过程。

1.3 状态势博弈

在上述调频过程中,DR分布在不同地区,VPP调频可采用分布式算法进行协调控制。势博弈描述参与者之间的相互作用和决策过程,各参与者根据自身利益和策略进行选择,以追求最大化效用。状态势博弈则是在势博弈的基础上考虑了参与者的状态变化,其会影响参与者的策略选择及其收益。

势博弈^[32]是指一个博弈中存在一个势函数,该函数与每个参与者的策略组合相关。在调频服务中,势博弈可以体现各DR之间的相互作用和决策过程的势函数。每个DR根据自身能力和状态,通过最大化势函数来寻求最优策略,只对自身效用产生影响,不影响其他DR的效用。这种博弈过程可以通过迭代的方式进行,每个DR根据其他DR的策略来更新自己的策略,直至达到均衡状态。

状态势博弈^[33]是势博弈的一种特殊形式。除了参与者的策略选择外,还考虑了博弈过程中的状态变量。在VPP调频服务中,状态变量为考虑DR对其自身状态要求的估计等。这些状态变量会影响每个DR的效用函数,从而影响DR的策略选择。因此,在进行状态势博弈时,每个DR在选择策略时应该考虑其他DR的策略选择和当前的状态变量,从而使均衡状态的计算更为复杂^[34],其定义见附录B。

通过引入状态势博弈,建立一个分布式算法协调控制DR参与调频服务。每个DR根据当前自身状态和其他DR的策略选择来决定自己的策略。通过考虑状态变化,增加了算法的灵活性和适应性,使DR能够根据当前的状态选择最优的策略,从而实现DR的协调控制。

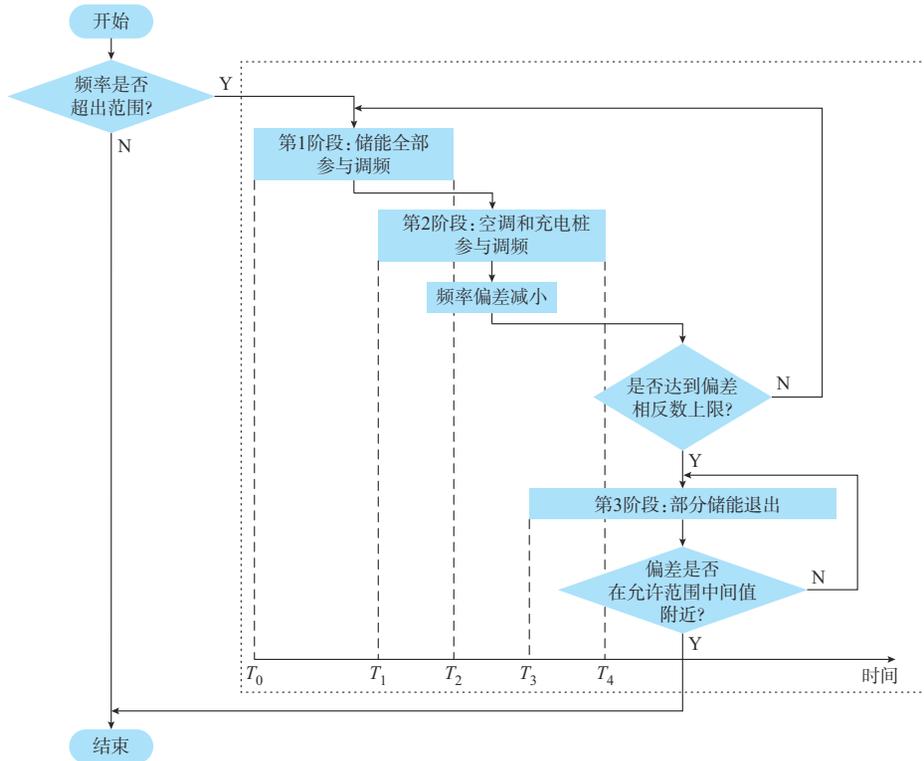


图2 DR参与调频流程图
Fig. 2 Flow chart of DR participating in frequency regulation

表1 调频过程时间
Table 1 Time of frequency regulation process

调频过程	时间/min
一次调频	0.5
二次调频	0.5~15.0
三次调频	>30.0

2 协调控制

2.1 聚合原则

在VPP参与辅助服务中,空调根据其自身的响应时间、响应速度以及可持续时间等多种因素决定其参与何种辅助服务。其中,调频辅助服务更加看重空调的响应速度和可响应频率。

为了确定DR参与调频的潜力,考虑将调频潜力较大的DR优先纳入调频服务,不仅有助于降低启停次数、减少调频成本,还能提高效率和灵活性。本文提出了DR聚合评价指标,即优先级指数,旨在衡量资源参与调频服务的优先程度,可以最大限度地利用DR的潜力,降低系统调频成本,提升整体调频服务的质量和稳定性。因此,充分考虑各DR的调频潜力十分重要。不同类型负荷的优先级指数定义如下。

1) 空调

由用户舒适度来决定空调参与调频服务的优先

级。其舒适度由室内温度与用户所能接受的最高温度和最低温度来决定。

$$K_{AC} = \begin{cases} T_{AC} - T_{AC,min} & f > 50.2 \text{ Hz} \\ T_{AC,max} - T_{AC} & f < 49.8 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{AC} 为空调负荷的优先级指数; T_{AC} 为室内温度; $T_{AC,max}$ 和 $T_{AC,min}$ 分别为用户所能接受的最高和最低室内温度; f 为频率。例如,在夏季可以考虑用户舒适温度区间为 $22\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$,当频率大于 50.2 Hz 时,需要增加负荷,通过增加空调出力,使频率降低到允许范围内,此时允许降低温度的容量为 $T_{AC} - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于2种频率偏差情况, K_{AC} 的值越大,资源越优先考虑参与调频。

2) 电动汽车和储能装置

电动汽车和储能优先级指数由实际已完成的充电量决定。考虑电动汽车的实际使用情况,要求其电量不能低于最低值 $S_{SOC,min}$,对于同一充电档位下的电动汽车,具体优先级指数设置如下:

$$K_{EV} = \begin{cases} 1 - S_{SOC} & f > 50.2 \text{ Hz} \\ S_{SOC} - S_{SOC,min} & f < 49.8 \text{ Hz} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{EV} 为电动汽车的优先级指数; S_{SOC} 为电动汽车当前的电量情况,当 $S_{SOC} = 1$ 时,表示电动汽车满电量。例如,考虑电动汽车实际使用情况,其电量应不低于总电量的 20% ,当频率小于 49.8 Hz 时,应减

少负荷,通过电动汽车放电使频率上升到允许范围内,此时允许的放电容量为 $S_{\text{SOC}} - 0.2$ 。对于2种频率偏差情况, K_{EV} 的值越大,资源越优先考虑参与调频。

储能的优先级指数与电动汽车计算方法相类似,即

$$K_{\text{ES}} = \begin{cases} 1 - e & f > 50.2 \\ e - e_{\min} & f < 49.8 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_{ES} 为储能的优先级指数; e 为储能当前的电量,当 $e = 1$ 时,表示此时储能满电量; e_{\min} 为储能电量的最低值,考虑储能实际使用寿命,要求储能电量不能低于最低值。例如,当频率大于50.2 Hz时,应增加负荷,通过对储能充电使频率降低到允许范围内,此时允许的充电容量为 $1 - e$ 。对于2种频率偏差情况, K_{ES} 的值越大,资源越优先考虑参与调频。

电动汽车还有必要考虑充电桩的挡位情况。将充电桩分为低、中、高3个挡位,其充电功率逐渐增加,处于低挡的充电桩优先考虑参与调频。在DR聚合后,调度平台收到电网的指令,将调频功率分配给DR,同种类型资源将按照优先级指数分配给相应的DR,其流程如附录A图A3所示。

2.2 协调控制过程

本文所考虑的可控负荷主要针对空调,其价值函数为:

$$V_{\delta,t}(k_{\delta,t}) = \alpha k_{\delta,t}^2 \lg(K_{\text{AC}}) P_{\text{AC,d,min}} - b c_{\text{AC}} |\Delta f| k_{\delta,t} \quad (4)$$

式中: $V_{\delta,t}(k_{\delta,t})$ 为 t 时刻第 δ 台空调的价值函数,其中, $k_{\delta,t}$ 为 t 时刻第 δ 台空调的单位调节功率; α 和 b 为修正系数; $P_{\text{AC,d,min}}$ 为空调放电功率的最小值; c_{AC} 为空调的成本系数。

电动汽车充电桩价值函数如下:

$$V_{i,t}(k_{i,t}) = \alpha(4 - h) k_{i,t}^2 \lg(K_{\text{EV}}) \min(P_{\text{EV,c}}, P_{\text{EV,d}}) - b c_{\text{EV,h}} |\Delta f| k_{i,t} \quad (5)$$

式中: $V_{i,t}(k_{i,t})$ 为 t 时刻第 i 个电动汽车充电桩的价值函数,其中, $k_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个电动汽车充电桩的单位调节功率; $P_{\text{EV,c}}$ 、 $P_{\text{EV,d}}$ 分别为电动汽车充电桩的充、放电功率; $h(h=1,2,3)$ 为电动汽车充电桩的挡位情况,调频时低挡优先参与; $c_{\text{EV,h}}$ 为电动汽车充电桩的成本系数,其中, $c_{\text{EV,1}}$ 、 $c_{\text{EV,2}}$ 、 $c_{\text{EV,3}}$ 分别为电动汽车充电桩低、中、高档位的成本系数。

储能价值函数为:

$$V_{j,t}(k_{j,t}) = \alpha \min(P_{\text{ES,c}}, P_{\text{ES,d}}) \lg(K_{\text{ES}}) k_{j,t}^2 - b c_{\text{ES}} |\Delta f| k_{j,t} \quad (6)$$

式中: $V_{j,t}(k_{j,t})$ 为 t 时刻第 j 个储能的价值函数,其

中, $k_{j,t}$ 为 t 时刻第 j 个储能的单位调节功率; $P_{\text{ES,c}}$ 、 $P_{\text{ES,d}}$ 分别为储能的充、放电功率; c_{ES} 为储能的成本系数。

将价值函数代入调频辅助服务,总价值函数表示当频率偏差限制在允许范围内时,价值函数最大。即

$$V_t(k_t) = \sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} V_{\delta,t}(k_{\delta,t}) + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} V_{i,t}(k_{i,t}) + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} V_{j,t}(k_{j,t}) \quad (7)$$

$$\sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} k_{\delta,t} + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} k_{i,t} + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} k_{j,t} = k_{\text{agc},t} \quad (8)$$

式中: $V_t(k_t)$ 为 t 时刻总价值函数,其中, k_t 为 t 时刻单位调节功率; S_{AC} 为由空调构成的集合; S_{EV} 为由电动汽车充电桩构成的集合; S_{ES} 为由储能构成的集合; $k_{\text{agc},t}$ 为 t 时刻总单位调节功率。

状态势博弈过程如图3所示,下文将从状态势博弈理论的5个要素对协调控制过程进行解释^[35]。

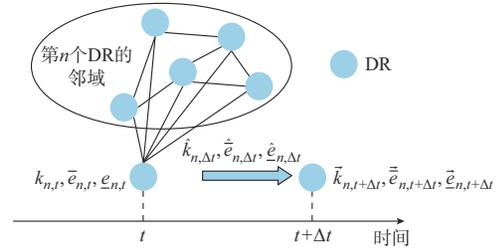


图3 状态势博弈过程
Fig. 3 Process of state-potential game

2.2.1 局中人

在协调控制中,空调、电动汽车充电桩和储能根据当前室温和电量等实际情况,合理规划自身出力情况,从而决定自身参与调频辅助服务的深度。局中人在指在博弈中处于有利地位或者具有决策权的参与者,可以通过自己的决策和策略来影响整个博弈的结果。在协调控制过程中涉及3类局中人:空调局中人、充电桩局中人以及储能局中人。

2.2.2 状态空间集

对于上述3类局中人而言,状态空间集包含局中人参与调频辅助服务的深度以及越限估计量。

3类局中人的单位调节功率应满足如下条件。

$$k_{\delta,t} \Delta F_{\text{dev}} \geq P_{\text{AC,d,min}} \quad (9)$$

$$k_{\delta,t} \geq 0 \quad (10)$$

$$k_{i,t} \Delta F_{\text{dev}} \geq \min(P_{\text{EV,c}}, P_{\text{EV,d}}) \quad (11)$$

$$k_{i,t} \geq 0 \quad (12)$$

$$k_{j,t} \Delta F_{\text{dev}} \geq \min(P_{\text{ES,c}}, P_{\text{ES,d}}) \quad (13)$$

$$k_{j,t} \geq 0 \quad (14)$$

式中: ΔF_{dev} 为系统最大允许频率偏差。

除了单位调节功率的限制,还应满足其自身的

限制。空调局中人的限制条件为:

$$P_{\delta,t} = P_{\delta,t}^{\text{ch}} + P_{\delta,t}^{\text{pu}} + P_{\delta,t}^{\text{f}} \quad (15)$$

$$T_{\text{AC},\text{min}} \leq T_{\text{AC},t} \leq T_{\text{AC},\text{max}} \quad (16)$$

式中: $P_{\delta,t}$ 为 t 时刻第 δ 台空调的放电功率; $P_{\delta,t}^{\text{ch}}$ 为 t 时刻第 δ 台空调制冷剂的电功率; $P_{\delta,t}^{\text{pu}}$ 为 t 时刻第 δ 台空调水泵的电功率; $P_{\delta,t}^{\text{f}}$ 为 t 时刻第 δ 台空调风机的电功率; $T_{\text{AC},t}$ 为 t 时刻室内温度。

对于电动汽车充电桩局中人而言,电动汽车充电桩的功率特性与电动汽车的特性相关联,即

$$P_{i,t}^{\text{min}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{max}} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta S_{\text{SOC},i,t}^{\text{min}} S_{i,t}}{\Delta t} \leq P_{i,t} \quad (18)$$

$$P_{i,t} \leq \frac{\Delta S_{\text{SOC},i,t}^{\text{max}} S_{i,t}}{\Delta t} \quad (19)$$

式中: $P_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个电动汽车充电桩的出力; $P_{i,t}^{\text{min}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻第 i 个电动汽车充电桩的最小、最大出力,其限制了充电桩的功率; $\Delta S_{\text{SOC},i,t}^{\text{min}}$ 、 $\Delta S_{\text{SOC},i,t}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻与第 i 个电动汽车充电桩相连的电动汽车荷电状态变化的最小、最大值; $S_{i,t}$ 为 t 时刻与第 i 个电动汽车充电桩相连的电动汽车的额定容量; Δt 为单位时间变化量。

对于储能局中人而言,其单位调节功率为:

$$P_{j,t}^{\text{min}} \leq P_{j,t} \leq P_{j,t}^{\text{max}} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta E_{j,t}^{\text{min}} E_{j,t}}{\Delta t} \leq P_{j,t} \quad (21)$$

$$P_{j,t} \leq \frac{\Delta E_{j,t}^{\text{max}} E_{j,t}}{\Delta t} \quad (22)$$

式中: $P_{j,t}$ 为 t 时刻第 j 个储能的出力; $P_{j,t}^{\text{min}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻第 j 个储能的最小、最大出力,其限制了储能的功率; $\Delta E_{j,t}^{\text{min}}$ 、 $\Delta E_{j,t}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻第 j 个储能电量变化的最小、最大值; $E_{j,t}$ 为 t 时刻第 j 个储能的额定容量。

越限估计量指的是对于总目标超出或不足的估计。将式(8)的约束转换为式(23)和式(24)来表述,即

$$\sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} k_{\delta,t} + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} k_{i,t} + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} k_{j,t} \geq k_{\text{agc},t} \quad (23)$$

$$\sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} k_{\delta,t} + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} k_{i,t} + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} k_{j,t} \leq k_{\text{agc},t} \quad (24)$$

因此,利用越限估计量对式(23)和式(24)进行表示,即

$$\begin{aligned} & \sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} \bar{e}_{\delta,t} + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} \bar{e}_{i,t} + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} \bar{e}_{j,t} = \\ & \sum_{i \in S_{\text{AC}}} k_{\delta,t} + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} k_{i,t} + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} k_{j,t} - k_{\text{agc},t} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} \underline{e}_{\delta,t} + \sum_{i \in S_{\text{EV}}} \underline{e}_{i,t} + \sum_{j \in S_{\text{ES}}} \underline{e}_{j,t} \sim \\ & k_{\text{agc},t} - \sum_{\delta \in S_{\text{AC}}} k_{\delta,t} - \sum_{i \in S_{\text{EV}}} k_{i,t} - \sum_{j \in S_{\text{ES}}} k_{j,t} \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $\bar{e}_{\delta,t}$ 、 $\bar{e}_{i,t}$ 、 $\bar{e}_{j,t}$ 分别为 t 时刻第 δ 台空调、第 i 个电动汽车充电桩、第 j 个储能对于式(23)的越限估计量; $\underline{e}_{\delta,t}$ 、 $\underline{e}_{i,t}$ 、 $\underline{e}_{j,t}$ 分别为 t 时刻第 δ 台空调、第 i 个电动汽车充电桩、第 j 个储能对于式(24)的越限估计量。

2.2.3 行动集

对于3类局中人而言,行动集包含局中人参与调频辅助服务的深度以及越限估计量的变化量。

空调局中人的行动集 a_{AC} 为:

$$a_{\text{AC}} = \{ \hat{k}_{\delta,t}, \hat{e}_{\delta \rightarrow m_{\text{AC}}}, \hat{e}_{\delta \rightarrow m_{\text{AC}}} \} \quad m_{\text{AC}} \in N_{\delta} \quad (27)$$

电动汽车充电桩局中人的行动集 a_{EV} 为:

$$a_{\text{EV}} = \{ \hat{k}_{i,t}, \hat{e}_{i \rightarrow m_{\text{EV}}}, \hat{e}_{i \rightarrow m_{\text{EV}}} \} \quad m_{\text{EV}} \in N_i \quad (28)$$

储能局中人的行动集 a_{ES} 为:

$$a_{\text{ES}} = \{ \hat{k}_{j,t}, \hat{e}_{j \rightarrow m_{\text{ES}}}, \hat{e}_{j \rightarrow m_{\text{ES}}} \} \quad m_{\text{ES}} \in N_j \quad (29)$$

式中: N_{δ} 为空调的邻域,表示与第 δ 台空调通过信道相连接的所有空调; N_i 为电动汽车充电桩的邻域,表示与第 i 个电动汽车充电桩通过信道相连接的所有充电桩; N_j 为储能的邻域,表示与第 j 个储能通过信道相连接的所有储能; $\hat{k}_{\delta,t}$ 、 $\hat{k}_{i,t}$ 、 $\hat{k}_{j,t}$ 分别为 t 时刻第 δ 台空调、第 i 个电动汽车充电桩和第 j 个储能的单位调节功率的改变量; \hat{e} 、 \hat{e} 分别为对于式(23)、式(24)的越限估计量的改变量;下标 $\delta \rightarrow m_{\text{AC}}$ 、 $i \rightarrow m_{\text{EV}}$ 和 $j \rightarrow m_{\text{ES}}$ 分别表示第 δ 台空调传递给第 m_{AC} 台空调、第 i 个电动汽车充电桩传递给第 m_{EV} 个电动汽车充电桩和第 j 个储能传递给第 m_{ES} 个储能的关于调频深度的指标。

2.2.4 效益函数

为了使所构建的博弈为状态势博弈,采用外部罚函数的方法构造3类局中人的效益函数及全局势函数,即

$$J_{\delta,t} = V_{\delta,t}(k_{\delta,t}) - \mu [(\max(0, \bar{e}_{\delta,t}))^2 + (\max(0, \underline{e}_{\delta,t}))^2] \quad (30)$$

$$J_{i,t} = V_{i,t}(k_{i,t}) - \mu [(\max(0, \bar{e}_{i,t}))^2 + (\max(0, \underline{e}_{i,t}))^2] \quad (31)$$

$$J_{j,t} = V_{j,t}(k_{j,t}) - \mu [(\max(0, \bar{e}_{j,t}))^2 + (\max(0, \underline{e}_{j,t}))^2] \quad (32)$$

$$\phi(k, a) = V_t(k_t) - \mu \phi^p(k, a) \quad (33)$$

式中: $J_{\delta,t}$ 为 t 时刻第 δ 台空调的效益函数; $J_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个电动汽车充电桩的效益函数; $J_{j,t}$ 为 t 时刻第 j 个储能的效益函数; μ 为罚因子; $\phi(k, a)$ 为全局势函数; $\phi^p(k, a)$ 为势函数 $\phi(k, a)$ 的罚项。

为了使势函数 $\phi(k, a)$ 最优, 应控制罚项 $\phi^p(k, a)$ 最小, 通过不断迭代, 在减小罚项的同时增大势函数。

$$\begin{aligned} \phi^p(k, a) = & \sum_{\delta \in S_{AC}} [(\max(0, \bar{e}_{\delta, t}))^2 + (\max(0, \underline{e}_{\delta, t}))^2] + \\ & \sum_{i \in S_{EV}} [(\max(0, \bar{e}_{i, t}))^2 + (\max(0, \underline{e}_{i, t}))^2] + \\ & \sum_{j \in S_{ES}} [(\max(0, \bar{e}_{j, t}))^2 + (\max(0, \underline{e}_{j, t}))^2] \end{aligned} \quad (34)$$

2.2.5 状态转移函数

为了让势函数 $\phi(k, a)$ 最优, 即使整体的效益函数最大。通过不断迭代行动集, 让罚项减小, 即让越限估计量减小并接近于0。

空调局中人状态转移函数为:

$$\vec{k}_{\delta, t} = k_{\delta, t} + \hat{k}_{\delta, t} \quad (35)$$

$$\vec{e}_{\delta, t} = \bar{e}_{\delta, t} + \hat{e}_{\delta, t} + \sum_{m_{AC} \in N_{\delta}} \hat{e}_{m_{AC} \rightarrow \delta} - \sum_{m_{AC} \in N_{\delta}} \hat{e}_{\delta \rightarrow m_{AC}} \quad (36)$$

$$\underline{e}_{\delta, t} = \underline{e}_{\delta, t} - \hat{k}_{\delta, t} + \sum_{m_{AC} \in N_{\delta}} \hat{e}_{m_{AC} \rightarrow \delta} - \sum_{m_{AC} \in N_{\delta}} \hat{e}_{\delta \rightarrow m_{AC}} \quad (37)$$

式中: $\vec{k}_{(\cdot)}, \vec{e}_{(\cdot)}, \underline{e}_{(\cdot)}$ 分别为 $k_{(\cdot)}, \bar{e}_{(\cdot)}, \underline{e}_{(\cdot)}$ 的状态转移函数; $\hat{k}_{(\cdot)}, \hat{e}_{(\cdot)}, \hat{e}_{(\cdot)}$ 分别为 $k_{(\cdot)}, \bar{e}_{(\cdot)}, \underline{e}_{(\cdot)}$ 的动作变量; 下标 $m_{AC} \rightarrow \delta$ 表示第 m_{AC} 台空调传递给第 δ 台空调的关于调频深度的指标。

电动汽车充电桩局中人状态转移函数为:

$$\vec{k}_{i, t} = k_{i, t} + \hat{k}_{i, t} \quad (38)$$

$$\vec{e}_{i, t} = \bar{e}_{i, t} + \hat{e}_{i, t} + \sum_{m_{EV} \in N_i} \hat{e}_{m_{EV} \rightarrow i} - \sum_{m_{EV} \in N_i} \hat{e}_{i \rightarrow m_{EV}} \quad (39)$$

$$\underline{e}_{i, t} = \underline{e}_{i, t} - \hat{k}_{i, t} + \sum_{m_{EV} \in N_i} \hat{e}_{m_{EV} \rightarrow i} - \sum_{m_{EV} \in N_i} \hat{e}_{i \rightarrow m_{EV}} \quad (40)$$

式中: 下标 $m_{EV} \rightarrow i$ 表示第 m_{EV} 个电动汽车充电桩传递给第 i 个电动汽车充电桩的关于调频深度的指标。

储能局中人状态转移函数为:

$$\vec{k}_{j, t} = k_{j, t} + \hat{k}_{j, t} \quad (41)$$

$$\vec{e}_{j, t} = \bar{e}_{j, t} + \hat{e}_{j, t} + \sum_{m_{ES} \in N_j} \hat{e}_{m_{ES} \rightarrow j} - \sum_{m_{ES} \in N_j} \hat{e}_{j \rightarrow m_{ES}} \quad (42)$$

$$\underline{e}_{j, t} = \underline{e}_{j, t} - \hat{k}_{j, t} + \sum_{m_{ES} \in N_j} \hat{e}_{m_{ES} \rightarrow j} - \sum_{m_{ES} \in N_j} \hat{e}_{j \rightarrow m_{ES}} \quad (43)$$

式中: 下标 $m_{ES} \rightarrow j$ 表示第 m_{ES} 个储能传递给第 j 个储能的关于调频深度的指标。

以上为局中人状态转移函数的表达式, 其中, 变化量采用梯度下降的方式得到其变化最快的情况, 故其行动集 $a = \{\{\hat{k}\}, \{\hat{e}, \underline{e}\}\}$ 的表达式如下。

空调局中人:

$$\hat{k}_{\delta, t} = \varepsilon [V'_{\delta, t} - 2\mu(\max(0, \bar{e}_{\delta, t}) - \max(0, \underline{e}_{\delta, t}))] \quad (44)$$

$$\hat{e}_{\delta \rightarrow m_{AC}} = 2\varepsilon\mu(\max(0, \bar{e}_{\delta, t}) - \max(0, \bar{e}_{m_{AC}, t})) \quad (45)$$

$$\hat{e}_{\delta \rightarrow m_{AC}} = 2\varepsilon\mu(\max(0, \underline{e}_{\delta, t}) - \max(0, \underline{e}_{m_{AC}, t})) \quad (46)$$

式中: $V'_{\delta, t}$ 为 $V_{\delta, t}$ 在 t 时刻的导数; ε 为迭代步长。

电动汽车充电桩局中人:

$$\hat{k}_{i, t} = \varepsilon [V'_{i, t} - 2\mu(\max(0, \bar{e}_{i, t}) - \max(0, \underline{e}_{i, t}))] \quad (47)$$

$$\hat{e}_{i \rightarrow m_{EV}} = 2\varepsilon\mu(\max(0, \bar{e}_{i, t}) - \max(0, \bar{e}_{m_{EV}, t})) \quad (48)$$

$$\hat{e}_{i \rightarrow m_{EV}} = 2\varepsilon\mu(\max(0, \underline{e}_{i, t}) - \max(0, \underline{e}_{m_{EV}, t})) \quad (49)$$

式中: $V'_{i, t}$ 为 $V_{i, t}$ 在 t 时刻的导数。

储能局中人:

$$\hat{k}_{j, t} = \varepsilon [V'_{j, t} - 2\mu(\max(0, \bar{e}_{j, t}) - \max(0, \underline{e}_{j, t}))] \quad (50)$$

$$\hat{e}_{j \rightarrow m_{ES}} = 2\varepsilon\mu(\max(0, \bar{e}_{j, t}) - \max(0, \bar{e}_{m_{ES}, t})) \quad (51)$$

$$\hat{e}_{j \rightarrow m_{ES}} = 2\varepsilon\mu(\max(0, \underline{e}_{j, t}) - \max(0, \underline{e}_{m_{ES}, t})) \quad (52)$$

式中: $V'_{j, t}$ 为 $V_{j, t}$ 在 t 时刻的导数。

3 灵活资源参与调频的过程

3.1 初始化

首先, 初始化全局参数, 包含参与调频辅助服务的初始空调数目 N_{AC} 、初始充电桩数目 N_{EV} 和初始储能数目 N_{ES} ; 其次, 确定空调、充电桩和储能局中人的初始单位调节功率 $k_{\delta, 0}$ 、 $k_{i, 0}$ 和 $k_{j, 0}$, 并设定总目标分配给空调、充电桩和储能的单位调节功率 $k_{age1, 0}$ 、 $k_{age2, 0}$ 和 $k_{age3, 0}$, 计算3类局中人的越限估计量。

$$\bar{e}_{\delta, 0} = k_{\delta, 0} - k_{age1, 0} \quad (53)$$

$$\underline{e}_{\delta, 0} = k_{age1, 0} - k_{\delta, 0} \quad (54)$$

$$\bar{e}_{i, 0} = k_{i, 0} - k_{age2, 0} \quad (55)$$

$$\underline{e}_{i, 0} = k_{age2, 0} - k_{i, 0} \quad (56)$$

$$\bar{e}_{j, 0} = k_{j, 0} - k_{age3, 0} \quad (57)$$

$$\underline{e}_{j, 0} = k_{age3, 0} - k_{j, 0} \quad (58)$$

式中: $\bar{e}_{\delta, 0}$ 和 $\underline{e}_{\delta, 0}$ 分别为第 δ 台空调对于式(23)和式(24)的初始越限估计量; $\bar{e}_{i, 0}$ 和 $\underline{e}_{i, 0}$ 分别为第 i 个电动汽车充电桩对于式(23)和式(24)的初始越限估计量; $\bar{e}_{j, 0}$ 和 $\underline{e}_{j, 0}$ 分别为第 j 个储能对于式(23)和式(24)的初始越限估计量。

最后, 按照状态转移函数更新各局中人的行动集和状态空间。当 $\bar{e}_{\delta, t}$ 、 $\bar{e}_{i, t}$ 和 $\bar{e}_{j, t}$ 满足精度要求时, 停止更新 $k_{\delta, t}$ 、 $k_{i, t}$ 和 $k_{j, t}$ 。

3.2 退出过程

当频率超出允许范围时,储能通过改变充放电过程参与电网调频,由于储能控制精度高且响应速度快,优先参与调频可以弥补大量可再生能源并网带来的频率偏差问题。若仅依靠储能无法将频率控制在允许范围内,则此时电动汽车充电桩和空调会加入调频过程,与储能一起提供深度的调频。在第2阶段调频过程中,电动汽车充电桩和空调会根据控制系统的指示调整运行模式,提供一定的功率输出,更有效地控制频率。完成第2阶段调频后,系统会继续检测频率偏差变化情况,并根据需求进行相应的后续调整。为了降低调频成本,系统会逐步减少对成本较高的储能的依赖。

退出调频服务常发生在DR有其他用途或需要预留容量应对突发问题时,DR退出会导致系统整体调频的深度发生变化,通过将退出DR的状态信息传输到与其他有关联的DR,基于成本以及自身价值通过状态势博弈重新优化其他DR的配置。对于DR加入的情况,由于其原本已经满足调频辅助服务需求,故无须重新优化^[35]。但是,DR在调频过程中退出将会导致其总体调频深度不足,难以将频率偏差限制在允许范围内,需要对参与调频的DR重新优化。

因此,当第 n 个DR退出调频辅助服务时,根据式(59)~式(62)计算越限估计量的改变值。最后,第 n 个DR更新自身越限估计量。

$$\hat{e}_{n \rightarrow l}(t+1) = \bar{k}_{n \rightarrow l} \quad (59)$$

$$\hat{e}_{n \rightarrow l}(t+1) = \underline{k}_{n \rightarrow l} \quad (60)$$

$$\sum_{l \in N_n} \bar{k}_{n \rightarrow l} = -k_{n,t} - \bar{e}_{n,t} \quad (61)$$

$$\sum_{l \in N_n} \underline{k}_{n \rightarrow l} = k_{n,t} + \underline{e}_{n,t} \quad (62)$$

式中: $\bar{k}_{n \rightarrow l}$ 、 $\underline{k}_{n \rightarrow l}$ 分别为 $t+1$ 时刻第 n 个DR传递给第 l 个DR的越限估计量 $\bar{e}_{n \rightarrow l}$ 、 $\underline{e}_{n \rightarrow l}$ 的变化量; $\bar{e}_{n,t}$ 、 $\underline{e}_{n,t}$ 分别为 t 时刻第 n 个DR对于式(23)、式(24)的越限估计量; $k_{n,t}$ 为 t 时刻第 n 个DR的单位调节功率; N_n 为第 n 个DR的邻域。

4 算例仿真验证

4.1 算例参数

设置仿真过程为120 min,电网系统旋转惯量 $H=10$,系统阻尼系数 $D=1\ 000$ 。在调频辅助服务过程中,最大允许频率偏差 $|\Delta F_{\text{dev}}|=0.2\text{ Hz}$,最大负荷扰动为0.05 p.u.。参与调频辅助服务的DR包括10个空调、10个充电桩和10个储能,主要参数

如附录A图A4所示,DR退出调频辅助服务时的状态如附录A图A5所示。

上述30个DR构成调频系统,为了将频率限制在允许范围内,需要满足单位调节功率总和大于2 100 kW/Hz,故本文取DR的目标单位调节功率为2 300 kW/Hz;设置全局参数修正系数 $\alpha=0.050$ 、 $b=2.275$;迭代步长 $\epsilon=0.005$;罚因子 $\mu=15$;越限估计量精度 $\xi=0.1$;成本系数 c_{AC} 、 $c_{\text{EV},1}$ 、 $c_{\text{EV},2}$ 、 $c_{\text{EV},3}$ 、 c_{ES} 分别为3、4、5、6、8元/MW。对于多时间尺度调频的3个阶段中,设置 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为0、35、40、160、180 s。

在仿真过程的120 min中,考虑以下3种情况:

- 1)当 $t_1=40\text{ min}$ 时,空调4(资源编号10)退出响应;
- 2)当 $t_2=80\text{ min}$ 时,充电桩5(资源编号14)退出响应;
- 3)当 $t_3=110\text{ min}$ 时,储能8(资源编号27)退出响应。

4.2 算例结果

在多时间尺度调频过程中,VPP开始参与调频的0~40 s内,储能全面投入调频,承担整个调频负荷;35~160 s时段内,VPP增加电动汽车充电桩和空调的参与,储能与充电桩和空调共同承担调频负荷,维持系统频率的稳定;在155 s之后,保持系统频率偏差在可以接受范围的前提下,VPP逐渐减少储能对调频的贡献,充电桩和空调将成为主要的调频资源。VPP灵活调整不同资源参与调频的深度,以实现系统频率的稳定。具体结果如附录A图A6和图A7所示。

附录A图A6和图A7表明,在调频开始后的前40 s内,所有储能均被投入使用,系统频率偏差逐渐减小,但仍未达到允许的偏差范围。35~160 s时段内,电动汽车充电桩和空调也被纳入调度范围。在155 s之后,储能的贡献比例降低,留下电动汽车充电桩和空调进行调度,导致频率偏差增大,但仍保持在允许的范围内。这种策略可以在保证系统供电需求的同时,减少对外部电网的依赖,挖掘其他DR调频潜力。

在120 min的仿真过程中,负荷扰动对系统频率影响显著,如附录A图A8和图A9所示。当负荷波动导致难以平衡时,会造成频率偏差超出允许范围。考虑在 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻,部分DR退出调频将导致系统调节能力的变化,使单位调节功率幅值出现变化,但尚未退出的DR会根据系统需要调整其参与调频的深度,以弥补调频深度不足的问题,如图4和图5所示。

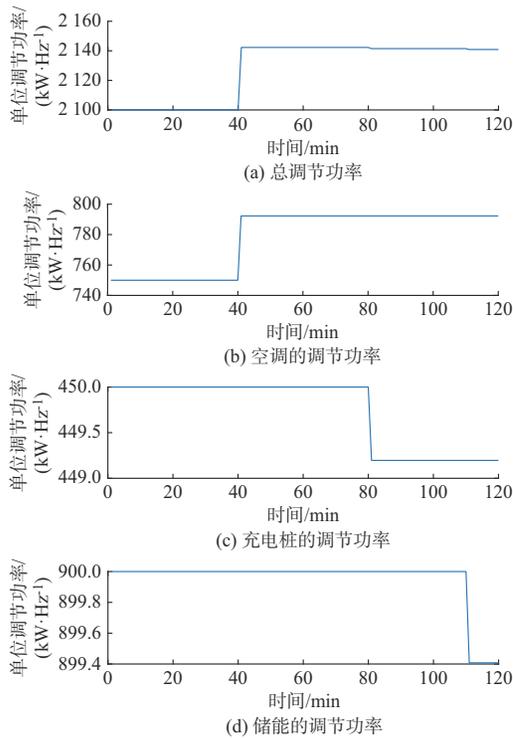


图4 考虑成本的调节功率变化情况
Fig. 4 Variation of regulatory power with consideration of costs

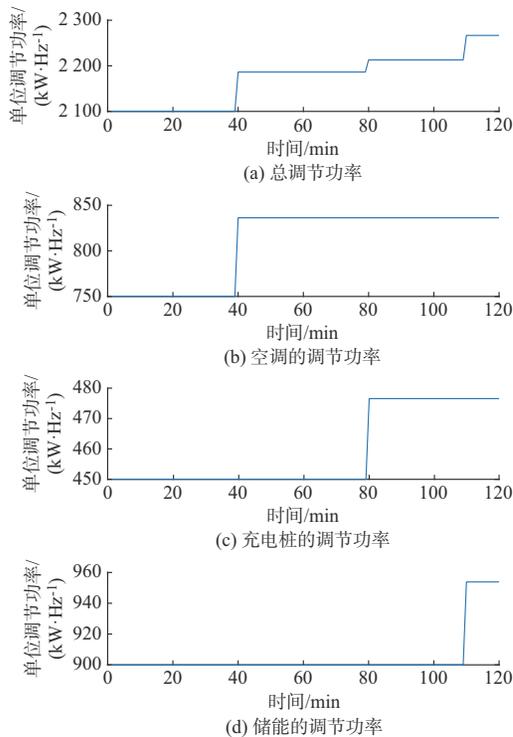


图5 未考虑成本的调节功率变化情况
Fig. 5 Variation of regulatory power without consideration of costs

本文对比了成本对资源重新配置的影响。在未考虑成本时,以调频能力为主要指标,使频率偏差保

持在允许范围内。而在考虑成本后,通过状态势博弈优化资源配置,发现DR在优化自身配置时为了提高系统调频的经济性,会优先选择成本较低的空调参与调频服务,能够有效地降低系统频率偏差,如附录A图A10所示。综合考虑成本、系统灵活性和经济性,调频服务应优先选择成本较低的空调。相比之下,储能和电动汽车充电桩参与调频可能会受到一定程度的影响。这一决策有助于降低系统运行成本,并优化系统的经济性。

由此可见,DR的参与可以提升系统调频能力,实时响应系统需求、调整单位调节功率以应对系统频率变化。DR参与还可以提高系统的灵活性和经济性,根据系统运行状态和需求灵活调整配置,从而实现系统频率的调节,进一步提高系统调频能力。

综上,在满足调频需求的同时考虑部分储能退出调频,依靠电动汽车充电桩和空调参与调频,可以减少储能参与调频服务的深度和时间,实现系统整体调频成本的降低,提高系统的经济性。

5 结语

在VPP背景下,多种可调负荷将根据各自的特性进行聚合,共同参与VPP调频过程。聚合后的DR具有较高的利用价值,基于此,本文提出了一种DR进行协调控制参与调频的方案,主要结论如下:

1) VPP通过分类和聚合不同类型的DR,更好地利用这些资源来稳定频率。多种DR参与调频服务,并通过优先级指数挖掘更大调频潜力的DR,有效降低系统频率偏差,提升调频稳定性和可靠性。

2) 在多时间尺度调频过程中,一次调频利用储能满足快速调频要求,其他DR在二次调频时增强系统调频能力,三次调频过程中部分储能退出,使系统频率保持在允许范围内,提高系统的调频经济性。

3) 部分DR退出系统可能导致调频深度不足,引入状态势博弈对剩余DR进行配置,每个DR根据自身状态和连接的DR进行优化配置,恢复总体调频效果。

本文仅考虑在VPP下满足通信状态和位置要求的DR参与调频服务,未考虑如光伏等DR由于其位置和状态较难满足要求时对调频性能的影响。为了维持电网频率在允许范围内,储能状态频繁变化。此外,本文基于VPP的调频策略,研究对象以用户侧和电网侧灵活资源为主,符合双碳目标下传统发电机组会逐步退出的趋势。因此,本文未将传统发电机组考虑纳入共同作用。后续研究将进一步考虑传统发电机与灵活资源的协同调频策略,并将灵活资源扩充至包含光伏在内的分布式电源等海量

资源,以增大系统调频深度,减少位置、通信状态等对调频性能的影响,并引入模糊化处理降低储能敏感度,减少频繁启停,使该方案更加具有实际应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术,2023,47(5):1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [2] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [3] 王薇.基于新能源的新型电力系统建设策略分析[J].集成电路应用,2023,40(5):162-163.
WANG Wei. Analysis on construction strategy of new power systems based on new energy [J]. Application of IC, 2023, 40(5): 162-163.
- [4] 赵赫,隋朝霞.基于平准化度电成本的风光火储一体化项目成本分析及比较[J].广东电力,2023,36(10):39-46.
ZHAO He, SUI Zhaoxia. Cost analysis and comparison of wind-photovoltaic-thermal-storage integration project based on LCOE[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 39-46.
- [5] 王勋.“双碳”目标下新型电力系统发展路径[J].电力与能源,2023,44(1):7-9.
WANG Xun. Development path of new power system based under the “dual carbon” goal [J]. Power & Energy, 2023, 44(1): 7-9.
- [6] 王宣元,刘蓁.虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J].电力系统自动化,2022,46(18):158-168.
WANG Xuanyuan, LIU Zhen. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 158-168.
- [7] 陈皓勇,谭碧飞,伍亮,等.分层集群的新型电力系统运行与控制[J].中国电机工程学报,2023,43(2):581-595.
CHEN Haoyong, TAN Bifei, WU Liang, et al. Operation and control of the new power systems based on hierarchical clusters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 581-595.
- [8] 周丹,童伟,汪蕾,等.含储能系统的区域电网快速调频控制策略[J].浙江工业大学学报,2021,49(2):186-193.
ZHOU Dan, TONG Wei, WANG Lei, et al. Fast frequency modulation control strategy of regional power grid with energy storage system [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(2): 186-193.
- [9] 施佳锋,张宏杰,李中伟,等.计及配电网约束的温控负荷参与电网二次调频的优化调度方法[J].自动化技术与应用,2022,41(8):84-88.
SHI Jiafeng, ZHANG Hongjie, LI Zhongwei, et al. Optimization dispatch method of temperature-controlled load participating in secondary frequency regulation of power grid considering distribution network constraints [J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(8): 84-88.
- [10] 付卓铭,胡俊杰,马文帅,等.规模化电动汽车参与电力系统二次调频研究综述[J].电力建设,2023,44(2):1-14.
FU Zhuoming, HU Junjie, MA Wenshuai, et al. Review of research on participation of numerous electric vehicles in power system secondary frequency-regulation service [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 1-14.
- [11] 季昆玉,贾俊,蒋中军,等.空调负荷虚拟同步机的负荷响应控制技术[J].电力需求侧管理,2019,21(6):55-58.
JI Kunyu, JIA Jun, JIANG Zhongjun, et al. Load response control of air conditioner virtual synchronous machine [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(6): 55-58.
- [12] 罗维祥,常喜强,伏睿,等.电动汽车负荷聚类及参与电网一次调频控制策略[J].科学技术与工程,2022,22(27):11958-11965.
LUO Weixiang, CHANG Xiqiang, FU Rui, et al. Electric vehicle load clustering and primary frequency modulation control strategy for participating power grid [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 11958-11965.
- [13] 李军徽,侯涛,穆钢,等.基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J].电力系统自动化,2020,44(19):63-72.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.
- [14] 袁桂丽,苏伟芳.计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与AGC调频服务研究[J].电网技术,2020,44(7):2538-2548.
YUAN Guili, SU Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548.
- [15] 张舒鹏,董树锋,徐成司,等.大规模储能参与电网调频的双层控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(19):55-62.
ZHANG Shupeng, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 55-62.
- [16] 王铭岐.电池储能系统参与系统一次调频控制策略研究[D].吉林:东北电力大学,2022.
WANG Mingqi. Research on primary frequency modulation control strategy of battery energy storage system participating system [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.
- [17] 包宇庆,姚兹丽.空调负荷参与电力系统调频的温度设定值概率控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(2):69-78.
BAO Yuqing, YAO Zili. Probability control strategy of temperature set-point for air conditioning load participating in frequency regulation of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 69-78.

- [18] 裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].电力系统自动化,2023,47(18):17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 17-32.
- [19] 马骏超,周洁洁,江全元,等.储能参与一次调频的优化控制策略研究[J].浙江电力,2021,40(9):3-9.
MA Junchao, ZHOU Jiejie, JIANG Quanyuan, et al. Study on optimal control strategy of primary frequency regulation of energy storage power station [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(9): 3-9.
- [20] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰.需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J].电力系统自动化,2021,45(6):148-157.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Reserve optimization and real-time scheduling of frequency regulation ancillary service with participation of flexible resource on demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 148-157.
- [21] 陈玉辰.考虑需求侧资源的源荷协同调频策略[D].南京:东南大学,2019.
CHEN Yuchen. Study on source-charge cooperative frequency modulation strategy considering demand side resources [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [22] 李振兴.多类型灵活资源参与电网调频的协调策略研究[D].南京:东南大学,2022.
LI Zhenxing. Research on coordination strategy of multi-type flexible resources participating in power grid frequency modulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [23] 林毅,林伟伟,张菁娴,等.计及调频效益的微电网源-荷动态频率调整研究[J].可再生能源,2023,41(5):660-666.
LIN Yi, LIN Weiwei, ZHANG Jingxian, et al. Research on source-load dynamic frequency adjustment of microgrid considering frequency modulation benefits [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(5): 660-666.
- [24] 潘明杰,解大,王西田.计及分布式资源调节特性差异的虚拟电厂响应策略[J].电力系统自动化,2022,46(18):108-117.
PAN Mingjie, XIE Da, WANG Xitian. Response strategy for virtual power plant considering difference in regulation characteristics of distributed energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 108-117.
- [25] 李润,徐天奇,李琰,等.不同控制策略下虚拟电厂一次调频特性研究[J].现代电子技术,2021,44(17):95-99.
LI Run, XU Tianqi, LI Yan, et al. Study on primary frequency modulation characteristics of virtual power plant using different control strategies[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(17): 95-99.
- [26] YANG J L, ZHENG Q R, ZHAO J L, et al. Control strategy of virtual power plant participating in the system frequency regulation service [C]// The 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), November 11-13, 2017, Hangzhou, China: 324-328.
- [27] 闫鹏,曾四鸣,李铁成,等.基于改进量子遗传算法的虚拟电厂在多时间尺度下参与AGC优化调度[J].电网与清洁能源,2023,39(3):23-32.
YAN Peng, ZENG Siming, LI Tiecheng, et al. Optimal scheduling of virtual power plant participating in AGC based on improved quantum genetic algorithm on multi-time scale [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 23-32.
- [28] 李聪,秦立军.基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J].太阳能学报,2023,44(1):426-434.
LI Cong, QIN Lijun. Sizing optimization for hybrid energy storage system independently participating in regulation market using improved particle swarm optimization [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(1): 426-434.
- [29] LIANG Y L, LIU F, MEI S W. Distributed real-time economic dispatch in smart grids: a state-based potential game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4194-4208.
- [30] 杨婕,李泽辉,马锴,等.基于小脑模型神经网络的温控负荷优化调度方法[J].电力系统自动化,2022,46(10):199-208.
YANG Jie, LI Zehui, MA Kai, et al. Optimal dispatch method of thermostatically controlled load based on cerebellar model articulation controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 199-208.
- [31] 陈长青,李欣然,张冰玉,等.基于多时间尺度的储能调峰调频协同控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(5):94-105.
CHEN Changqing, LI Xinran, ZHANG Bingyu, et al. Energy storage peak and frequency modulation cooperative control strategy based on multi-time-scale[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 94-105.
- [32] MONDERER D, SHAPLEY L S. Potential games [J]. Games and economic behavior, 1996, 14(1): 124-143.
- [33] MARDEN J R. State based potential games [J]. Automatica, 2012, 48(12): 3075-3088.
- [34] 梁易乐,刘锋,梅生伟.基于状态势博弈的电力系统分布式经济调度方法[J].系统科学与数学,2016,36(3):413-425.
LIANG Yile, LIU Feng, MEI Shengwei. A state-based potential game approach for distributed economic dispatch [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(3): 413-425.
- [35] 曾君,胡家健,徐铭康,等.储能汇聚参与辅助调频服务的协同优化算法[J].控制理论与应用,2021,38(7):1051-1060.
ZENG Jun, HU Jiajian, XU Mingkang, et al. Collaborative optimization algorithm for aggregating energy storage in frequency modulation service [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(7): 1051-1060.

莫理莉(1980—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:新能源电力系统运行与控制、虚拟电厂、综合能源规划与运行等。E-mail:llmo@scut.edu.cn

兰峻焜(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:虚拟电厂。E-mail:742920392@qq.com

周亮(1981—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力市场、电力经济学、虚拟电厂等。E-mail:zhouliang@csg.cn

陈皓勇(1975—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力经济与电力市场、新能源发电与智能电网技术、虚拟电厂、综合能源系统与能源物联网等。E-mail:eehychen@scut.edu.cn

(编辑 冯慧敏)

Multi-timescale Frequency Regulation Control of Flexible Resources in Virtual Power Plant

MO Lili^{1,2}, LAN Junkun¹, ZHOU Liang³, YE Meng³, MA Li³, CHEN Haoyong¹

- (1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Architectural, Design Research Institute Co., Ltd., South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: With the promotion of the transition of energy structure, the utilization of renewable energy is gradually increasing, and it is difficult to meet the demand by relying on traditional units to regulate frequency deviation. Therefore, in order to solve this problem, the use of distributed resources (DRs) to participate in frequency regulation auxiliary services is considered. The DRs are mainly considered as air conditioners, electric vehicle charging piles and energy storage. First, the characteristics and satisfaction evaluation methods of DRs are considered. Then, DRs are controlled coordinately based on the state-potential game theory and centralized to externally present as a whole to participate in the frequency regulation auxiliary services. Finally, the feasibility and effectiveness of aggregation and coordinated control of DRs to participate in frequency regulation auxiliary services under the proposed control strategy are demonstrated through simulation cases, and the participation of energy storage, charging piles, and controllable loads in the fast frequency regulation under multiple time scales is verified.

This work is supported by China Southern Power Grid Company Limited (No. GDKJXM220220333).

Key words: virtual power plant; distributed resource; flexible resource; coordinated control; multi-timescale control; frequency regulation auxiliary service; state-potential game

