

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.02.009

配电网格虚拟电厂动态频率聚合控制策略

肖小龙^{1,2}, 史明伟^{1,2}, 吴凡^{1,2}, 陆晓星^{1,2}, 郭宁^{1,2}, 郭佳豪^{1,2}(1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏南京 211103;
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:为充分发挥各类分布式资源的特点和配电网的可调节能力,以提供性能更优的动态辅助服务,文中提出一种面向配电网格虚拟电厂(meshed distribution virtual power plant, MVPP)的动态频率聚合控制方法。首先,明确MVPP的整体架构,建立针对一次调频场景、能够聚合其内部各类分布式资源动态特性的频率控制模型。然后,采用基于自适应动态频率匹配的控制方法解决动态频率聚合模型控制设计问题,通过在线自适应方法分解期望特性,并利用H_∞最优鲁棒控制方法为各设备设计本地反馈控制器,精确动态匹配分解一次调频的期望特性。仿真结果验证了所提控制方法的有效性,该方法能在负载扰动、新能源出力波动等场景下,通过各资源互补显著改善系统一次调频特性。所提策略可为空间分布的聚合单元参与动态调频辅助服务提供新的解决思路。

关键词:虚拟电厂;配电网;一次调频;鲁棒控制;分布式电源;自适应控制

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)02-0080-13

0 引言

在“双碳”目标的指引下,以光伏、风电等为代表的新能源得到了规模化发展^[1-2],并将逐步代替传统能源成为新型电力系统的主体^[3-4]。虽然各类新能源具有环保、灵活、经济等优势,但其出力的波动性和不可控性增加了系统中功率供需不平衡的可能^[5-7],给系统频率稳定带来较大挑战。与此同时,电网中传统同步发电机比例下降,而基于变流器的新能源发电设备输出阻抗低、惯性小、阻尼特性差^[8],导致频率扰动难以快速恢复。因此,亟须挖掘新型调节资源的调频潜力^[9-13]。

越来越多的分布式能源、新型储能、可控负荷等接入配电网,不仅增加了配电网运行的灵活性,也提升了配电网的可调节能力^[14-15],为系统快速频率支撑提供了新的可能。但配电网中各可调资源接入方式、出力特性不同,且容量较小,单一调控难度较大。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)理论为上述问题提供了可行的解决思路。因此,基于传统VPP架构,可将配电网内各类型资源聚合形成配电网格虚拟电厂(meshed distribution virtual power plant, MVPP)并统一调控,使其对外呈现设定的聚合特性,对内实现功率快速分配和消纳,形成具有分布式资源管理、频率调节等多种功能的新型配电网系统^[16-17]。

不同于传统VPP, MVPP类似于一个广义的

收稿日期:2025-06-07;修回日期:2025-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2166202)

VPP,包含更大的区域范畴,在控制策略的设计中,不仅要考虑常规VPP所能完成的辅助服务,还要考虑内部拓扑等因素^[18]。传统VPP多侧重于研究多主体的优化调度和利益分配问题,而MVPP则重点关注多类型分布式资源的动态协同调控问题^[19],以提高电网在调频、调压等辅助服务情境下的动态响应能力^[20],具有快速、灵活、经济性优等特点。因此,开展MVPP的控制策略研究具有重要意义。

现有文献中VPP参与频率支撑的策略多为静态功率跟踪或参与日前、日内辅助服务市场的优化,主要目标为跟踪日前或日内给定的出力计划并实现收益的最大化。文献[21]提出基于一致性算法的VPP集群自治调度策略,实现VPP的动态指令跟踪。文献[22]考虑风光出力及市场电价的不确定风险,设计多类型分布式资源协同的VPP参与主辅市场联合优化策略,提升了MVPP的综合收益。文献[23]在日前阶段以调度收益最佳为目标,日内阶段以自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统调频效果最优为目标,提出基于改进量子遗传算法的优化调度方法,提升了MVPP参与多时间尺度辅助调频的性能。综上所述,现有文献较少考虑VPP在短时间尺度下的快速频率支撑能力,未充分利用分布式资源响应速度快的优势,缺乏对MVPP参与系统动态辅助服务策略的研究。

在此基础上,有少数文献提出MVPP辅助一次调频的方法,文献[21]提出包含风、光、储的VPP短期频率响应策略,但此方法仅聚焦于提供频率控制,未考虑设备层面的约束,且方法是非自适应的,

在应对新能源出力波动时具有一定局限性。文献[24]针对空间分布 MVPP 单元进行一次调频控制, 然而其未考虑各设备之间的线路阻抗, 导致聚合行为分析不精确。

多数文献的研究对象集中于单一类型或某几种特定类型的分布式资源。文献[22]通过改进的概率密度函数预测风电的不确定性, 并在此基础上提出计及市场交易的风电场参与电力系统频率调节方法, 在保证电网频率稳定的同时提高了风电的利用率和收益。文献[23]针对电动汽车提出基于混合整数线性规划的双层控制调频策略, 兼顾频率偏差最小化与电动汽车收益最大化。文献[25]建立含混合储能及电动汽车的 VPP 参与 AGC 调频模型, 通过改进遗传算法等方法优化调度, 显著提高了 VPP 的 AGC 调频效果。文献[26]提出风储联合参与频率调节的控制策略, 有效利用风储协同增效优势, 提升调频性能。现有文献的研究方法也较为局限, 通常利用启发式算法, 考虑含多 VPP 的配电网参与长时间尺度的能源调度和需求响应^[27], 并未考虑调频过程中可利用分布式资源的动态特性。文献[28]虽然考虑了风电场和储能系统的动态特性, 利用模型预测控制方法最大程度补充有功功率差额, 然而若分布式资源变化, 控制约束和模型将不再成立, 且控制方法计算量较大, 会影响实际的控制效果。

在对场景层面, 现有文献中聚合单元的组成一般是特定的, 不能扩展到其他设备, 所以其控制策略不具有通用性, 而且多数文献研究主要集中在 VPP 的调度优化和长时间尺度的辅助服务领域, 更快时间尺度上的动态辅助服务往往被忽视。而利用 MVPP 参与辅助服务, 能充分利用已有的大量分布式资源。不同于单一场景的调频, MVPP 拓展了电力系统的可调控资源, 增加了其进行系统调节的参与度。在方法策略层面, 现有文献未明确各分布式能源的聚合控制设计, 从而无法利用各分布式资源的异构性实现动态辅助服务所需的聚合行为, 在提供辅助服务期间缺乏良好性能和可靠性。而 MVPP 包含了多类以电力电子接口为主、具备秒级灵活调节能力、可优化频率特性的分布式资源, 因此有必要设计一种灵活、快速的调频策略。

基于以上分析, 文中提出一种动态频率聚合控制策略。所提方法考虑了不同类型分布式能源的聚合, 从设备级层面进行建模, 并利用分布式资源在调节幅度、响应时间、持续时间等方面的互补特性进行一次调频。此外, 基于自适应动态参与因子

设计的方式考虑了时变量的限制, 如容量、响应时间、天气因素、成本等, 同时考虑了空间拓扑, 并利用最优鲁棒控制方法降低控制误差、精确匹配期望调频特性, 为 VPP 参与系统调频提供了新的思路。

1 MVPP 架构

MVPP 在整体电网的定位如图 1 所示, AVC 为自动电压压制。整个系统由主网-区域电网-配电馈线聚合单元-最小聚合单元构成, 区域电网基于供电可靠性、范围、源荷比例分配和发展规划等划分网格, 具备作为平衡单元的物理基础。网格上承分区电网, 下连台区, 是配电网潮流输送的枢纽^[29], 便于对区域进行更加独立且精细化的管理。在实际工程应用中, 也同样需要考虑不同类型网格用电性质的差异性, 而这种有序的网格化管理, 也为 VPP 的整体分层控制提供了逻辑基础。文中“网格化”仅仅作为上级电网划分配网馈线聚合单元的一个条件, 且此问题停留在规划层面, 并不是文中的重点。文中着重研究在网格划分完成的基础上考虑网格单元内配网馈线单元参与系统的辅助服务的场景。

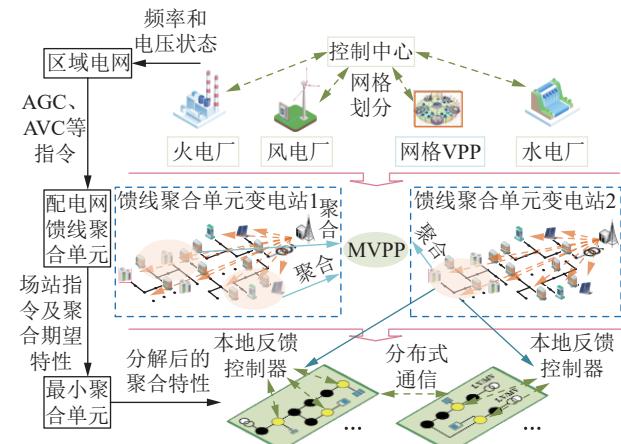


图 1 MVPP 参与系统的整体架构
Fig.1 Overall architecture of MVPP participating in the power grid

MVPP 包含多个馈线聚合单元, 馈线聚合单元包含微电网、台区等最小聚合单元, 每个聚合控制单元可作为一个整体对外提供灵活动态响应调节服务, 并受到部署在变电站的 MVPP 控制系统的集中控制。在实际应用中, 独立营销户号的分布式光伏、风机、储能电站、各类工商业负荷等资源都可以作为最小聚合单元的组成部分。控制系统向上与水、火电站共同连接至外部 110 kV 高压电网, 并通过通信、数据库等方式获取配网自动化系统中的配网数据和地调调令等; 向下通过 5G 等通信方式

连接至各聚合单元,下达聚合调控指令。

基于上述架构,文中所提策略的总体框架如图2所示,其中OADF为在线自适度动态因子。首先,基于聚合频率控制模型建立MVPP的总体频率控制目标,并建立最小聚合单元模型;然后,在聚合条件的基础上进行各设备直流增益的在线求解,并根据频率控制目标得到各最小聚合单元所需的传输特性;最后,基于求得的传输特性建立控制器的参考模型,并利用 H_∞ 最优鲁棒控制求解,实现MVPP参与系统一次调频服务场景的动态聚合控制。

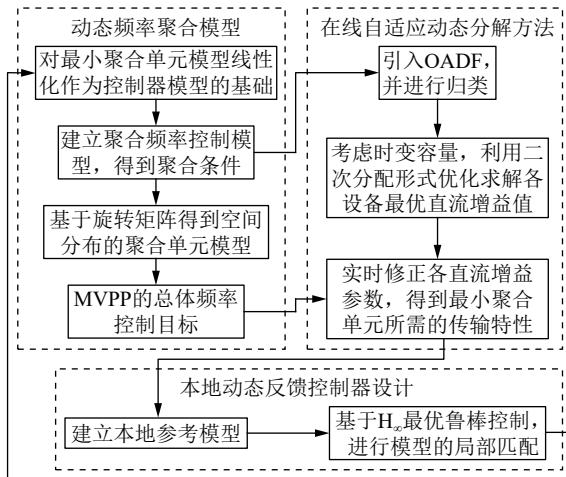


图2 总体研究框架

Fig.2 The overall research framework

2 MVPP 动态频率聚合模型

2.1 最小聚合单元模型

根据图1建立下层的最小聚合单元模型。考虑一组基于逆变器模型的分布式能源控制设置,文中针对电网的一次调频场景建立频率聚合控制。符号 Δ 统一表示任意变量相对于其稳态平衡点的小信号偏差。假设所有分布式资源均连接于输电网的同一总线,将其接收聚合点(point of coupling, POC)测量的频率偏差 Δf_{POC} 作为输入信号。第*i*个设备的有功功率偏差输出为 Δp_i ,则第*k*个最小聚合单元的总有功功率偏差输出 Δp_k 可表示为各设备功率偏差之和。

为了分析各分布式资源在一次调频中的动态响应特性,文中采用拉普拉斯域中的传递函数进行建模。因此,各变量均表示为复频率变量s的函数:

$$\Delta p_i(s) = T_i(s)\Delta f_{\text{POC}}(s) \quad i \in M \quad (1)$$

$$\Delta p_k(s) = \sum_{i \in M} T_i(s)\Delta f_{\text{POC}}(s) \quad (2)$$

式中: $T_i(s)$ 为局部闭环传递函数,其表征了从测量有功功率到施加频率调整这一解耦控制回路的所有动态环节,即功率变换器动态、滤波器动态、网

侧变换器控制回路动态、直流侧动态以及电源特性(如风力发电机、光伏系统等)动态,并在本地控制器的参考模型中有所体现,以便变流器控制模型跟踪其参考特性;集合 M 为最小聚合单元下所有参与聚合的可控分布式电源。

为了得到可以用于后续控制策略设计的简化换流器模型,需要对逆变器模型进行线性和合理降阶,其中,逆变器模型的交流侧主要包含滤波器、电流环、锁相环(phase locked loop, PLL)和功率计算等动态环节。系统的动态行为可由式(3)—式(6)描述,其中所有带 dq 下标的变量均为二维向量:

$$\mathbf{v}_{\text{ctrl},dq}^* = \mathbf{v}_{\text{ctrl},dq} + Z_k \mathbf{i}_{dq} + k_{p,i}(\mathbf{i}_{dq}^* - \mathbf{i}_{dq}) + k_{i,i} \mathbf{x}_{i,dq} \quad (3)$$

$$\frac{L_k}{\omega_b} \dot{\mathbf{i}}_{dq} = -Z_k \mathbf{i}_{dq} + \mathbf{v}_{\text{ctrl},dq} - \mathbf{v}_{dq} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{i,dq} = \mathbf{i}_{dq}^* - \mathbf{i}_{dq} \quad (5)$$

$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (6)$$

式中: $k_{p,i}$ 、 $k_{i,i}$ 分别为设备*i*比例-积分(proportional-integral, PI)控制器中的比例系数和积分系数; $\mathbf{x}_{i,dq}$ 为设备*i*PI控制器中的积分状态变量,核心作用为消除稳态误差; ω_b 为基准频率; Z_k 为第*k*个最小聚合单元的等效阻抗; L_k 为第*k*个最小聚合单元的滤波电感; \mathbf{v}_{dq} 为换流器端电压,其*d*、*q*轴分量分别为 v_d 和 v_q ; $\mathbf{v}_{\text{ctrl},dq}$ 、 \mathbf{i}_{dq} 分别为控制环路输出*dq*轴的电压和电流; i_d 、 i_q 分别为 \mathbf{i}_{dq} 的*d*、*q*轴分量; $\dot{\mathbf{i}}_{dq}$ 为 \mathbf{i}_{dq} 对时间的导数; $\dot{\mathbf{x}}_{i,dq}$ 为 $\mathbf{x}_{i,dq}$ 对时间的导数; p 为换流器交流侧输出的瞬时有功功率; $\mathbf{v}_{\text{ctrl},dq}^*$ 、 \mathbf{i}_{dq}^* 分别为 $\mathbf{v}_{\text{ctrl},dq}$ 、 \mathbf{i}_{dq} 的参考值。

为了得到适用于控制器设计的线性化小信号模型,须在稳态工作点附近对式(3)—式(6)进行线性化处理。首先,作出以下标准假设:(1)通过PLL将*d*轴与电网电压矢量对齐,由此可令 $v_d \approx v^*$ 、 $v_q \approx 0$,其中 v^* 为并网点电网电压的额定幅值;(2)假设系统运行在某一稳态工作点,并对各变量叠加小信号扰动。

由于文中主要关注有功-频率控制,因此仅聚焦于*d*轴分量的动态行为。将上述假设应用于式(3)—式(6),并进行线性化。

首先对式(4)的*d*轴分量进行线性化,得到描述*d*轴电流的动态方程:

$$\frac{L_k}{\omega_b} \Delta \dot{i}_d = -Z_k \Delta i_d + \Delta v_{\text{ctrl},d} - \Delta v_d \quad (7)$$

式中: $v_{\text{ctrl},d}$ 为 $\mathbf{v}_{\text{ctrl},dq}$ 的*d*轴分量; $\Delta \dot{i}_d$ 为*d*轴电流偏差 Δi_d 对时间的变化率。

其次,对式(3)的*d*轴分量进行线性化,得到*d*轴控制电压的表达式:

$\Delta v_{\text{ctrl},d}^* = \Delta v_{\text{ctrl},d} + Z_k \Delta i_d + k_{p,i} (\Delta i_d^* - \Delta i_d) + k_{i,i} \Delta x_{i,d}$ (8)
式中: $x_{i,d}$ 为设备 i 的 d 轴积分状态变量; i_d^* 为 i_{dq}^* 的 d 轴分量; $v_{\text{ctrl},d}^*$ 为 $v_{\text{ctrl},dq}^*$ 的 d 轴分量。

假设电流环路响应足够快, $v_{\text{ctrl},dq}^*$ 能精确跟踪 $v_{\text{ctrl},dq}^*$, 即 $v_{\text{ctrl},dq} \approx v_{\text{ctrl},dq}^*$, 进而得出 $\Delta v_{\text{ctrl},d}^* \approx \Delta v_{\text{ctrl},d}$ 。此时, 考虑到滤波器和线路的电抗-电阻比通常较高, 故忽略 Z_k 的影响以简化模型。同时, 忽略并网点电压扰动, 即 $\Delta v_d \approx 0$ 。联立线性化后的式(3)和式(4)的 d 轴分量, 得到描述 d 轴电流偏差的动态核心方程:

$$\Delta \dot{i}_d = \frac{\omega_b}{L_k} [k_{p,i} (\Delta i_d^* - \Delta i_d) + k_{i,i} \Delta x_{i,d}] \quad (9)$$

然后, 对式(5)的 d 轴分量进行线性化, 得到 d 轴的积分状态变量偏差的动态方程:

$$\Delta \dot{x}_{i,d} = \Delta i_d^* - \Delta i_d \quad (10)$$

式中: $\Delta \dot{x}_{i,d}$ 为 $\Delta x_{i,d}$ 对时间的变化率。

结合上述假设, 对式(6)进行线性化, 得到 Δp 与 Δi_d 之间的代数关系:

$$\Delta p = v^* \Delta i_d \quad (11)$$

综上, 式(9)—式(11)共同构成了描述系统有功-频率动态变化的线性化小信号模型, 为后续控制器设计奠定了基础。

2.2 聚合频率控制模型

为补偿由传统同步发电机在网络中提供的辅助服务, 针对各最小聚合单元在上层配电网馈线层面聚合方式的问题, 为聚合后模型设定解耦的有功-频率控制关系作为期望的传输特性 $T^*(s)$:

$$\Delta p_k(s) = T^*(s) \Delta f_{\text{POC}}(s) \quad (12)$$

将式(12)和式(2)比较可以得到聚合条件:

$$\sum_{i \in M} T_i(s) = T^*(s) \quad (13)$$

动态频率控制策略的核心是为各设备找到本地设备级控制器, 使式(13)聚合条件成立。在此过程中, 需确保各分布式电源在正常运行期间不超过其实际设备限制, 并确保设备级的稳定性, 详细的控制器设计见第3章。

2.3 空间分布聚合单元模型

最小聚合单元或馈线聚合单元中的分布式电源成空间分布, 因此需要将传统意义上连接到单条总线的控制模型进行推广。以设计聚合控制器为目标, 文中考虑一种广义的聚合模型, 其中分布式电源在空间上分布在电力系统的一个区域内, 并通过 POC 与剩余电网相连。

为了调节聚合点处的频率, 需要考虑空间分布的分布式资源间无电感的线路阻抗和相关的有功损耗, 保障聚合点处的频率调节效果, 在高电阻-电

抗比值的配电网中更是如此。所以, 考虑通过引入旋转矩阵 \mathbf{K} 改变瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q ^[30]:

$$\begin{bmatrix} p_D \\ q_D \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & -\frac{R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: p_D 、 q_D 分别为节点 u 、 v 之一的改进有功、改进无功功率; Z 为线路阻抗, R 为线路电阻, X 为线路电抗, 且 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ 。

因此, 可以得到网络母线间潮流方程的改进形式:

$$\begin{cases} \sin \delta = \frac{p_D Z}{v_{\text{bus_}u} v_{\text{bus_}v}} \\ \cos \delta = -\frac{q_D Z}{v_{\text{bus_}u}} + \frac{v_{\text{bus_}u}}{v_{\text{bus_}v}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $v_{\text{bus_}i}$ 、 $v_{\text{bus_}j}$ 分别为 u 、 v 节点电压幅值; δ 为功角。由式(15)可知, 对于足够小的 δ 和电压幅值差, p_D 、 q_D 能通过 δ 独立影响电网频率和电压幅值, 类似于传统的通过有功调节电网频率的方法。

通过上述方法, 将聚合单元区域所有有功功率量替换为改进后的有功功率量, 以获取解耦的有功-频率控制关系。由此, 可以给出改进后的动态聚合响应特性, 作为聚合单元的总体频率控制目标。

$$\Delta f_{\text{POC}}(s) = T_D^*(s) \sum_{i \in M} \Delta p_D(s) = \left[\frac{X}{Z} T_D^*(s) \quad -\frac{R}{Z} T_D^*(s) \right] \begin{bmatrix} \sum_{i \in M} \Delta p_{\text{POC}}(s) \\ \sum_{i \in M} \Delta q_{\text{POC}}(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $T_D^*(s)$ 为考虑空间分布后期望的转移特性; $\Delta p_D(s)$ 为 P_D 的偏差, 其引入是为了在线路阻抗影响下获得解耦的有功-频率控制关系; $\sum_{i \in M} \Delta p_{\text{POC}}(s)$ 、 $\sum_{i \in M} \Delta q_{\text{POC}}(s)$ 分别为 POC 处所有设备输出的总有功功率和总无功功率的偏差。仍可以将 $\left[\frac{X}{Z} T_D^*(s) \quad -\frac{R}{Z} T_D^*(s) \right]$ 视为传输特性 $T_V^*(s)$, 并根据解耦的有功-频率控制关系满足推导的聚合条件。

3 自适应动态频率聚合控制方法

3.1 控制架构

采用基于自适应动态频率匹配的控制策略解决动态频率聚合模型的控制设计问题, 控制器架构见图3。该策略主要由两个步骤组成。

(1) 期望特性分解。首先, 上层控制系统根据设备 i 的时变最大功率 $p_i^{\max}(t)$ 和从相邻电源获取的

信息,在线计算出设备*i*的自适应动态参与因子*n_i(t)*。该因子与*T^{*}(s)*相结合,生成设备*i*的*T_i(s)*。

(2)本地动态匹配。随后,通过本地反馈控制器使设备的实际动态响应最优匹配分解后的期望特性。具体而言,PLL根据并网点的三相电压*v_{abc}*实时估算电网角频率*w_{PLL}*和相位角*θ_{PLL}*。*w_{PLL}*作为输入,经过一个PI环节后,生成期望的*Δp_i*。*H_x*最优鲁棒控制器将此*Δp_i*期望值与通过功率计算模块得到的*p, q*进行比较,并结合系统状态(如*i_{dq}*和*x_{i,dq}*)计算出最优的*i_{dq}^{*}*。该参考值最终通过电流、电压控制环和脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)生成驱动逆变器的调制信号。

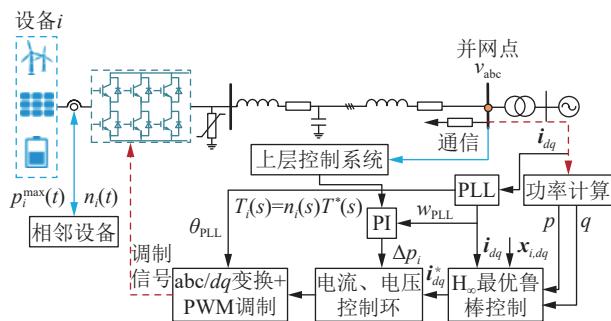


图3 自适应动态频率聚合控制策略

Fig.3 Adaptive dynamic frequency aggregation control strategy

3.2 在线自适应动态分解方法

基于MVPP的动态频率聚合模型,通过加入本地匹配条件可以将所需的传输特性分解到各个设备:

$$T_i(s) = n_i(s)T^*(s) \quad \forall i \in M \quad (17)$$

*n_i(s)*包含有功-频率控制关系的自适应动态参与特性。

结合式(13)代表的聚合条件,可得:

$$\sum_{i \in M} n_i(s) = 1 \quad (18)$$

考虑到式(17)本地匹配条件的可解性,要求每个参考模型的特性都经过仔细选择,从而在正常工作条件下能够被关联的器件动态匹配。一方面,要求*T^{*}(s)*是预先合理设定的;另一方面,同样需要根据单个器件的动态特性和限制选择*n_i(s)*,使其满足式(18),同时考虑到本地分布式电源动态、多类时间尺度及正常运行工况时的稳态功率容量限制。因此,期望通过多个参数确定OADF^[31]。可将*n_i(s)*的形式分为3类。

(1)对于有较长时间尺度和提供稳态增益调节的设备,如光伏、风机等大部分分布式资源,以及以电动汽车充电桩为代表的柔性负荷,存在类似于低通滤波器的动态因子,即:

$$n_i(s) = \frac{\beta_i}{\alpha_i s + 1} \quad (19)$$

式中:*α_i*为设备*i*的时间常数,须考虑不同分布式电源功率动态的时间尺度;*β_i*为设备*i*传递函数的直流增益,其物理意义对应于传统的下垂控制增益,用于在设备间进行稳态有功功率的分配,其数值取决于设备在稳态时的最大可调功率容量及其调节成本。

(2)对于能够在快速时间尺度上提供调节的设备,如超级电容等快速释放和存储能量的功率型储能设备,存在类似于高通滤波器(high-pass filter, HPF)的动态因子。非低通类形式的设备因为出力时间很短,调节成本近似无差别,即:

$$n_i(s) = \frac{\alpha_i s}{\alpha_i s + 1} K_{SOC,i} \quad (20)$$

$$K_{SOC,i} = \begin{cases} 0 & \lambda_{SOC,i} \in [0, \lambda_{SOC,min}] \\ \frac{\lambda_{SOC,i} - \lambda_{SOC,min}}{\lambda_{SOC,max} - \lambda_{SOC,min}} & \lambda_{SOC,i} \in (\lambda_{SOC,min}, \lambda_{SOC,max}) \\ 1 & \lambda_{SOC,i} \in [\lambda_{SOC,max}, 1] \end{cases} \quad (21)$$

式中:*K_{SOC,i}*为设备*i*考虑储能荷电状态(state of charge, SOC)的系数;*λ_{SOC,i}*为设备*i*的SOC;*λ_{SOC,min}*、*λ_{SOC,max}*分别为设备*i* SOC 设定的最小值和最大值。

(3)对于动态特性介于上述两类间的剩余设备(如蓄电池等功率型储能设备),存在类似于带通滤波器(band-pass filter, BPF)的动态因子,即:

$$n_i(s) = \frac{(\alpha_k - \alpha_j)s}{(\alpha_k s + 1)(\alpha_j s + 1)} K_{SOC,i} \quad (22)$$

式中:*α_k*、*α_j*分别为构成该带通滤波器特性的低通和高通环节的时间常数。

需要注意的是,具有BPF或HPF特性的OADF总具有定义下的恒定零直流增益,即*n_i(s=0)=0*。相反,对于所有类似LPF特性设备的OADF,必须满足:

$$\sum_{i \in M} n_i(s=0) = 1 \quad (23)$$

低通滤波器(low-pass filter, LPF)类设备的直流增益可以在线调整,与设备的时变功率容量限制成比例,并考虑各电源的调节成本。采用最优的二次分配问题(quadratic assignment problem, QAP)可以快速方便地求得各设备最优的直流增益值,同时尽可能最小化总的加权直流增益,求解函数见式(24),其中等式约束保证式(18)成立。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\beta_i(t)} \sum_{i \in M_{LPF}} \frac{1}{P_i^{max}(t)} \times \frac{c_i}{\sum_{l=1}^n c_l} \beta_i^2(t) \\ \text{s.t. } \sum_{i \in M_{LPF}} \beta_i(t) + \sum_{r \in \mathcal{L}} n_{r,k}(0) = 1 \\ \beta_i(t) \geq 0 \quad \forall i \in M_{LPF} \end{array} \right. \quad (24)$$

其中: $\beta_i(t)$ 为第 i 个可控设备的直流增益分配系数; M_{LPF} 为所有属于 LPF 特性的可控设备的集合; \mathcal{L} 为不可控设备集合; $n_{r,k}(0)$ 为第 k 个最小聚合单元内, 集合 \mathcal{L} 中第 r 个不可控设备的直流增益^[32]; n 为参与求和的不可控设备的总数量; c_i 、 c_l 分别为第 i 和第 l 个设备的单位调节成本; $p_i^{\max}(t)$ 为设备 i 的时变有功容量极限, 位于该时刻下设备的最低限值 $p_{i,\text{low}}^{\max}(t)$ 和最高限值 $p_{i,\text{up}}^{\max}(t)$ 之间。值得注意的是, 作为 OADF 的一个特例, LPF 类设备的 $\beta_i(t)$, 即 $n_i(t)$ 的稳态部分, 并非是无界变化的, 而是受限于一个运行区间 $[n_{i,\text{low}}(t), n_{i,\text{max}}(t)]$ 。其中, $n_{i,\text{max}}(t)$ 、 $n_{i,\text{low}}(t)$ 分别为 $n_i(t)$ 的上界和下界, 其大小取决于功率容量的上下界。直流增益的时变值由 QAP 形式的最优解表示:

$$\beta_i(t) = \left(1 - \sum_{r \in \mathcal{L}} n_{r,k}(0)\right) \frac{p_i^{\max}(t)}{\sum_{i \in M_{\text{LPF}}} p_i^{\max}(t)} \quad (25)$$

β_i 须满足式(23)的总和约束, 并反映各设备功率能力的物理意义, 故得到 β_i 与各可控设备的功率容量限制成比例。值得一提的是, 功率容量的限值基于气候等其他复杂因素影响, 很可能是时变的。在电力系统运行过程中, 直流增益和有功容量极限以基于分布式共识的方式进行更新。以直流增益为例, 形如:

$$\beta_i(t+1) = \beta_i(t) - \mu \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} \tau_j(t) \quad i, j \in M_{\text{LPF}} \quad (26)$$

式中: $\beta_i(t+1)$ 为下一时刻设备 i 的直流增益预设值; μ 为时间常数; $\lambda_{i,j}$ 为相邻设备 i, j 直流增益之间的权重; $\tau_j(t)$ 为设备 j 的一致性指标。当所有设备的 $\tau_j(t)$ 收敛到一个相同的值时, 即认为达成共识, 确定的 $\beta_i(t+1)$ 值作为下一时刻的 $\beta_i(t)$ 。

3.3 本地动态反馈控制器设计

本地动态反馈控制器的目标是期望对于每个可控器件, 设计一个匹配控制器, 使得设备的实际动态响应特性与式(17)相匹配。其作用为在直流增益变化、实际设备的稳态模型不确定性和非线性因素存在时, 控制器能最佳匹配每个设备获得的局部期望特性, 同时满足设备级电流限制条件。

文中用 H_∞ 最优鲁棒控制解决局部匹配控制设计问题, H_∞ 最优鲁棒控制在计算处理上相对简单, 并为 3.2 节直流增益的求解提供了次最优保障, 从而能限制设备在多种运行条件下的控制性能弱化和瞬态指标越限^[33]。

对于每个可控设备, 期望找到一个匹配的控制器。令输出向量 $\mathbf{y} = [\Delta p \quad \Delta q]^\top$, 扰动向量 $\mathbf{w} = [\Delta f \quad \Delta v]^\top$, 其中 Δf 、 Δv 分别为并网点的频率和电压偏差。控制对象设置是含网侧变流器的降阶线性系统, 结合式(3)—式(6), 令状态向量 $\mathbf{x} = [\Delta i_d \quad \Delta x_{i,d}]^\top$, Δi_d^* 作为控制输入 \mathbf{u} 的元素。系统状态空间方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Ew} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} + \mathbf{Fw} \end{aligned} \quad (27)$$

式中: \mathbf{A} 为系统矩阵; \mathbf{B} 为输入矩阵; \mathbf{C} 为输出矩阵; \mathbf{D} 为前馈矩阵; \mathbf{E} 、 \mathbf{F} 分别为扰动作用于状态和输出的矩阵。各设备本地参考模型则包含在控制环路中, 可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_s &= \mathbf{A}_s(\boldsymbol{\Psi}(t))\mathbf{x}_s + \mathbf{E}_s(\boldsymbol{\Psi}(t))\mathbf{w} \\ \mathbf{y}_s &= \mathbf{C}_s(\boldsymbol{\Psi}(t))\mathbf{x}_s + \mathbf{F}_s(\boldsymbol{\Psi}(t))\mathbf{w} \end{aligned} \quad (28)$$

式中: \mathbf{x}_s 、 \mathbf{y}_s 分别为参考模型的状态向量和输出向量; $\dot{\mathbf{x}}_s$ 为 \mathbf{x}_s 对时间的导数; 状态空间矩阵 \mathbf{A}_s 、 \mathbf{E}_s 、 \mathbf{C}_s 、 \mathbf{F}_s 的含义与式(27)中的 \mathbf{A} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{F} 相对应, 下标 s 用于区分其属于参考模型; $\boldsymbol{\Psi}(t)$ 为时变参数向量, 该向量根据所选器件的 OADF, 由各异的 $n_i(t)$ 组成。又由于 $n_i(t)$ 在区间 $[n_{i,\text{low}}(t), n_{i,\text{max}}(t)]$ 上有界变化, 所以 $\boldsymbol{\Psi}(t)$ 的取值范围可视为固定的顶点多胞体, $\boldsymbol{\Psi}_i$ 为多胞体第 i 个顶点, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

所以, 结合式(27)和式(28), 并假设匹配误差 $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_s$, 通过将 \mathbf{e} 积分作为反馈, 以增强匹配设计对模型不确定性和对不同设备实际非线性特征的鲁棒能力。于是, 可以得到用于 H_∞ 控制策略设计的增广系统:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_s \\ \sigma \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_s(\boldsymbol{\Psi}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & -\mathbf{C}_s(\boldsymbol{\Psi}) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_s \\ \sigma \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{E}_s(\boldsymbol{\Psi}) \\ \mathbf{F} - \mathbf{F}_s(\boldsymbol{\Psi}) \end{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{e} &= [\mathbf{C} - \mathbf{C}_s(\boldsymbol{\Psi}) \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_s \\ \sigma \end{bmatrix} + \\ &\quad \mathbf{D}\mathbf{u} + [\mathbf{F} - \mathbf{F}_s(\boldsymbol{\Psi})]\mathbf{w} \end{aligned} \quad (29)$$

式中: $\mathbf{0}$ 为零矩阵; σ 为匹配误差 \mathbf{e} 的积分。该增广系统可以进一步表示为式(30)的紧凑形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{G}} = (\mathbf{A}(\boldsymbol{\Psi}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\Psi})\mathbf{K}(\boldsymbol{\Psi}))\mathbf{G} + \mathbf{E}(\boldsymbol{\Psi})\mathbf{w} \\ \mathbf{e} = (\mathbf{C}(\boldsymbol{\Psi}) + \mathbf{D}(\boldsymbol{\Psi})\mathbf{K}(\boldsymbol{\Psi}))\mathbf{G} + \mathbf{F}(\boldsymbol{\Psi})\mathbf{w} \end{cases} \quad (30)$$

其中:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}}_s \\ \sigma \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_s(\Psi) & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & -\mathbf{C}_s(\Psi) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}(\Psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{E}_s(\Psi) \\ \mathbf{F} - \mathbf{F}_s(\Psi) \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}(\Psi) = [\mathbf{C} \quad -\mathbf{C}_s(\Psi) \quad \mathbf{0}] \\ \mathbf{D}(\Psi) = \mathbf{D} \\ \mathbf{F}(\Psi) = \mathbf{F} - \mathbf{F}_s(\Psi) \end{array} \right. \quad (31)$$

式中: \mathbf{G} 为闭环系统的状态向量; $\dot{\mathbf{G}}$ 为 \mathbf{G} 对时间的导数; 闭环系统矩阵 $\mathbf{A}(\Psi)$ 、 $\mathbf{B}(\Psi)$ 、 $\mathbf{C}(\Psi)$ 、 $\mathbf{D}(\Psi)$ 、 $\mathbf{E}(\Psi)$ 和 $\mathbf{F}(\Psi)$ 分别对应于式(29)中相应的分块矩阵。设定的控制律为 $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}(\Psi(t))\mathbf{G}(t)$, 通过对式(30)所表示的闭环系统进行拉普拉斯变换, 可以得到从 $w(s)$ 到 $e(s)$ 的闭环传递函数 $V(s)$, 即 $e(s) = V(s)w(s)$ 。 H_∞ 控制的目标即为最小化该传递函数的 H_∞ 范数, 以获得最佳的扰动抑制性能。由于直接最小化 H_∞ 范数是一个非凸优化问题, 通常将其转化为一个更易于求解的可行性问题。即引入一个正的上界常数 γ , 寻找一个控制器 $\mathbf{K}(\Psi(t))$ 使得闭环系统的 H_∞ 范数小于 γ , 并使 γ 尽可能小。由此可以得到参数依赖的状态反馈增益 $\mathbf{K}(\Psi(t))$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\mathbf{K}(\Psi)} \gamma \\ \text{s.t. } \|V(s)\|_{s \rightarrow \infty} < \gamma \end{array} \right. \quad (32)$$

式中: $V(s)$ 是由前述闭环系统得到的传递函数阵; γ 为一个表征系统鲁棒性能的上界常数, H_∞ 控制的目标即为最小化 γ , 以获得最佳的扰动抑制性能。 H_∞ 域可以用线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 的形式重新表述, 从而将问题转化为一个易求解的凸优化问题。根据有界实引理, 式(31)的 H_∞ 域等价于 LMI, 即式(33)的 LMI 条件矩阵 $N(\Psi)$ 是负定的。

$$\begin{aligned} N(\Psi) = & \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\mathbf{A}(\Psi) + \mathbf{B}(\Psi)\mathbf{K}(\Psi))^T + & \mathbf{P}^T(\mathbf{C}(\Psi) + \\ & (\mathbf{A}(\Psi) + \mathbf{B}(\Psi)\mathbf{K}(\Psi))\mathbf{P} & \mathbf{D}(\Psi)\mathbf{K}(\Psi))^T \\ \mathbf{E}(\Psi)^T & -\gamma\mathbf{I} & \mathbf{F}(\Psi)^T \\ (\mathbf{C}(\Psi) + \mathbf{D}(\Psi)\mathbf{K}(\Psi))\mathbf{P} & \mathbf{F}(\Psi) & -\gamma\mathbf{I} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{P} 为对称正定矩阵, 被用来构造李雅普诺夫函数, 以证明闭环系统的稳定性。因

此, 要确保系统闭环稳定, 当且仅当对 $\Psi(t)$ 的所有符合值, \mathbf{P} 存在对称正定矩阵解。

如图 3 所见, 可以利用控制律 $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}(\Psi(t))\mathbf{G}(t)$ 得到 \mathbf{u} 的新值。最终, 得到控制环的输入 $i_d^* = \Delta i_d^* + i_{d,0}^*$, 其中, $i_{d,0}^*$ 为 d 轴电流参考值在稳态工作点的平衡值。

4 算例分析

4.1 算例参数设置

为验证所提自适应动态频率聚合控制方法在 MVPP 应用的有效性, 展示控制策略的基本思想, 文中使用一个简易实用的仿真系统, 该系统仅包含分布式光伏、风机、储能、电动汽车充电桩聚合单元。然而, 文中方法可以很方便地扩展到包括多个馈线聚合单元或最小聚合单元的更大、更复杂的系统, 因为部署的本地分布式电源匹配控制独立于 MVPP 的规模和所连接的电力系统。此外, 系统网络大小或拓扑仅仅影响系统输入信号, 而不影响系统内部行为。文中在 MATLAB/Simulink 环境下按照图 1 所包含的 MVPP 基本架构建立图 4 所示的区域电网-配网馈线-最小聚合单元的仿真系统结构, 假设在 $t=0$ s 整个系统已经进入稳态。

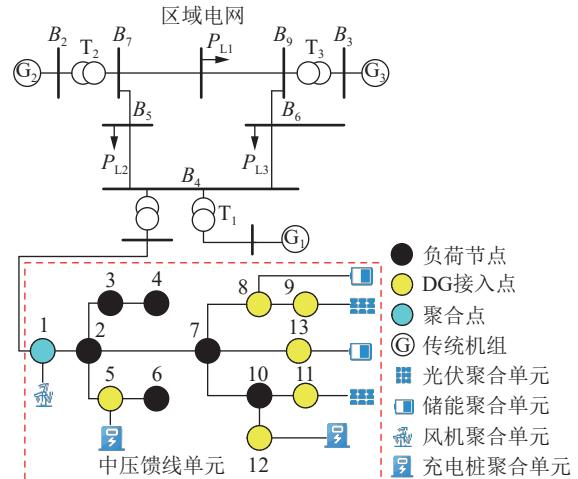


图 4 仿真拓扑
Fig.4 Simulation topology

该系统包含 7 个分布式聚合单元, 区域电网采用标准的三机九节点系统, 图中编号 B 、 P_L 、 T 分别表示母线、负荷和变压器, 具体参数数值见参考文献[34]。

中压配电网采用修改的 IEEE 13 馈线系统连接在 B_4 节点, 最小聚合单元连接在空间分布的不同节点。IEEE 13 馈线系统中所有线路电阻-电抗比约为 1, 含有 12 个负荷节点, 参考文献[35]。其中 1、5、8、9、11、12、13 节点分别接入风机、充电桩 1、储能(超级电容)、光伏 1、光伏 2、充电桩 2、

储能(蓄电池)聚合单元,负荷均采用恒功率模型。

对于传统机组,文中对配有 ST1A 型励磁系统的同步电机采用 8 阶模型,该励磁系统配有自动电压调节器和电力系统稳定器。调速器建模为具有一阶延迟的比例下垂速度控制,参数来自文献[34]。

区域电网系统基准功率为 100 MV·A,基准频率为 50 Hz,基准电压为 230 kV,中压配电网基准电压为 35 kV。式(3)的 $k_{p,i}$ 、 $k_{i,i}$ 设定为 0.456 和 5.322, Z_k 为 $0.009+j0.089$ p.u.。

根据式(19)—式(22)和式(25),设定各设备参数如下。

(1) 风机。额定功率为 3 MW, $\alpha_i=1.3$ s, $p_{i_low}^{\max}=0$ MW, $p_{i_up}^{\max}=3$ MW, $c_i=0.6$ 元/(kW·h)。

(2) 光伏。额定功率分别为 1 MW 和 0.8 MW, $\alpha_i=0.6$ s, $p_{1_low}^{\max}=0$ MW, $p_{1_up}^{\max}=1$ MW, $p_{2_low}^{\max}=0$ MW, $p_{2_up}^{\max}=0.8$ MW, $c_i=0.7$ 元/(kW·h)。

(3) 电动汽车充电桩。额定功率为 0.7 MW, $\alpha_i=0.5$ s, $p_{i_low}^{\max}=0$ MW, $p_{i_up}^{\max}=0.7$ MW, 为模拟不同充电桩聚合单元的经济异构性,将 c_i 分别设定为 0.8 元/(kW·h) 和 1 元/(kW·h)。

(4) 储能(超级电容)。额定功率为 0.8 MW, $\alpha_i=0.2$ s, $\lambda_{SOC,min}=0.2$, $\lambda_{SOC,max}=0.9$, $\lambda_{SOC,i}$ 初值为 0.6, $|p_{i_low}^{\max}|=0$ MW, $|p_{i_up}^{\max}|=0.6$ MW。

(5) 储能(蓄电池)。额定功率为 1 MW, $\alpha_i=0.2$ s, $\alpha_j=0.4$ s, $\lambda_{SOC,min}=0.2$, $\lambda_{SOC,max}=0.9$, $\lambda_{SOC,i}$ 初值为 0.6, $|p_{i_low}^{\max}|=0$ MW, $|p_{i_up}^{\max}|=1$ MW。

(6) 期望的频率聚合特性传递函数 $T^*(s)$ 。此函数作为本地控制器的跟踪目标,其形式设定为: $T^*(s)=\frac{-D_s-M_ss}{\alpha_ss+1}$,其中, D_s 为等效下垂系数; M_s 为等效惯性时间常数; α_s 为一阶系统的时间常数,各参数由系统运营商确定。在仿真算例中,为模拟一个典型的一次调频性能指标要求^[36],设定 $D_s=30$ 、 $M_s=12$ s、 $\alpha_s=0.2$ s。

计算负载突变、光伏容量波动时,文中控制方法的调频性能和匹配控制等效果,并与其他各类方法对比,验证文中方法的有效性。

4.2 负载突变场景

验证文中控制方法在频率突减下的 2 个核心目标:一是评估所提方法对抑制系统频率跌落的整体效果;二是检验 3.3 节设计的本地控制器能否精确匹配期望的有功功率指令。为此, $t=5$ s 时在母线 B_7 处施加 15 MW 的负荷阶跃。

4.2.1 整体辅助一次调频效果验证

为验证文中整体控制策略在一次调频场景下

的效果,将其与仅靠传统机组控制、采用 PI 控制、文献[20]策略和期望的频率响应曲线进行比较,如图 5 所示。

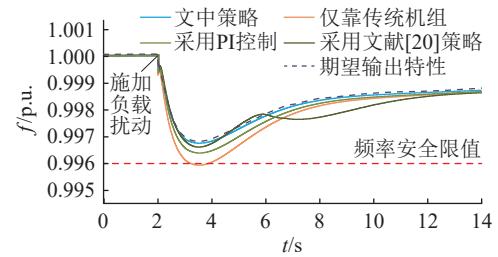


图 5 POC 频率响应曲线

Fig.5 Frequency response curves of POC

图 5 的频率响应曲线说明了文中自适应动态频率聚合控制方法通过协同 MVPP 内各资源进行辅助一次调频,具有更优的动态性能和抵御扰动的能力,系统频率最低值为 0.996 8 p.u.,同时文中所提策略也能较好地跟踪设定的 $T^*(s)$ 。而若各资源采用传统 PI 控制,虽也能一定程度上抑制频率波动,但其系统频率最低值为 0.996 4 p.u.,低于文中策略,而且不能较好地跟踪系统的参考频率特性。若仅依赖传统机组进行调频,系统频率最低值将达到 0.995 9 p.u.,超出频率安全限制。采用文献[20]的策略可以提升频率前期的上升速度,且其频率最低值也高于 PI 控制,但整体调节时间更长。

4.2.2 本地控制策略效果验证

同时,3.3 节本地动态反馈控制器的设计可以实现所需的有功的精确匹配,如图 6 中各单元有功出力增量、期望输出和总出力曲线所示。

从图 6 可见,所有设备的实际有功功率输出都能精确匹配其解耦后的期望功率输出。需要说明的是,在 $t=2$ s 附近出现的尖峰虽不能完全同步跟随,但文中方法的响应时间小于 0.015 s,在响应之后就能与期望的有功聚合曲线近似吻合。文中策略利用各资源在调节幅度、响应时间、持续时间等方面上的互补特性,能在面对扰动时有较强的鲁棒性。

4.2.3 瞬态指标验证

仿真得到的各聚合单元变换器电流瞬时值曲线如图 7 所示。文中最优鲁棒控制策略能在扰动发生时较好地限制设备瞬态指标越限的情况。

由图 7 所示,在仿真过程中,各单元变换器电流瞬时值在每一时刻的绝对值均小于分配的限值,暂态性能得到了保证。这是因为,为了保证精确的模型匹配,需要设计较大的控制增益,但这可能导致瞬态电流超限。为此,文中控制器设计明确地将输入约束纳入 H_∞ 优化求解过程。这确保了所设计

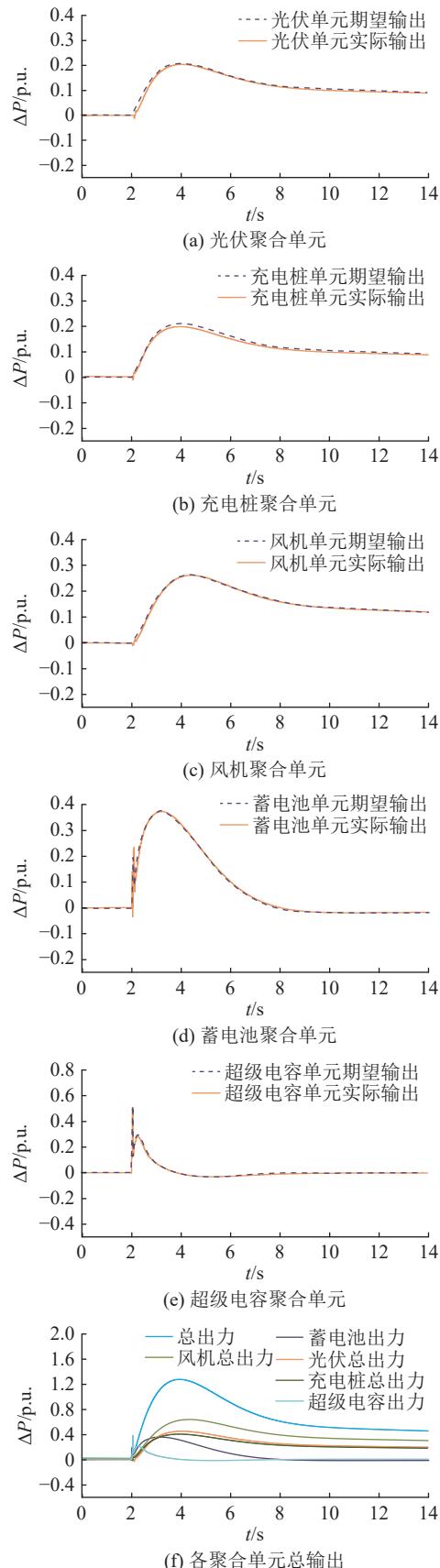


图 6 负载扰动情况下各单元有功功率输出和期望输出曲线

Fig.6 The actual and expected active power outputs of each unit under load disturbance

的控制器在追求高动态性能的同时，其输出也严格

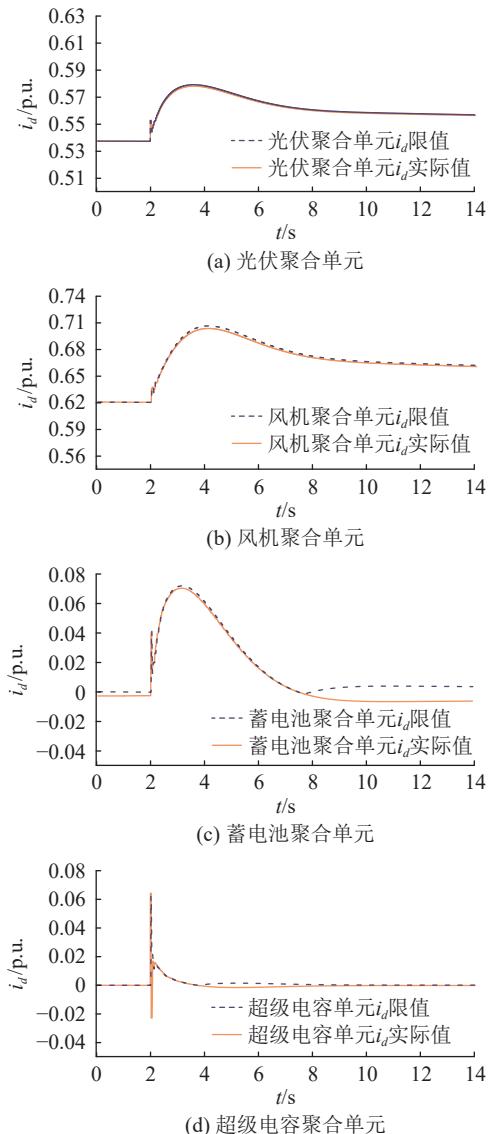


图 7 各单元 i_d 的实际值和其限值曲线

Fig.7 The actual and limit value of each i_d

遵守物理限制，从而达到图示的良好效果。

4.3 光伏容量波动场景

需要考虑新能源有功出力限制出现突变时，系统的频率特性和 3.2 节在线自适应动态分解方法的有效性。基于 4.2 节设置的负荷扰动，假设在 $t=2.1$ s 因为天气原因引起光伏有功功率容量限制的阶跃，容量限制突降为正常情况下的 0.15 倍。该场景下的系统频率响应和各单元功率输出如图 8 所示。

如图 8 所示，在光伏容量波动时，期望的频率聚合特性传递函数仍然能被很好地跟踪。这是因为各设备的 OADF 能够自动适应光伏的出力变化，在线调整各自的控制参数，如式(33)所示，从而确保每个设备都能基本实现其动态分配到的有功功率调节任务。风机、电动汽车充电桩的 OADF 被用来补偿光伏缺失的聚合控制，以满足频率的动态性能。然而，如果仍旧采用一个非自适应控制器而不

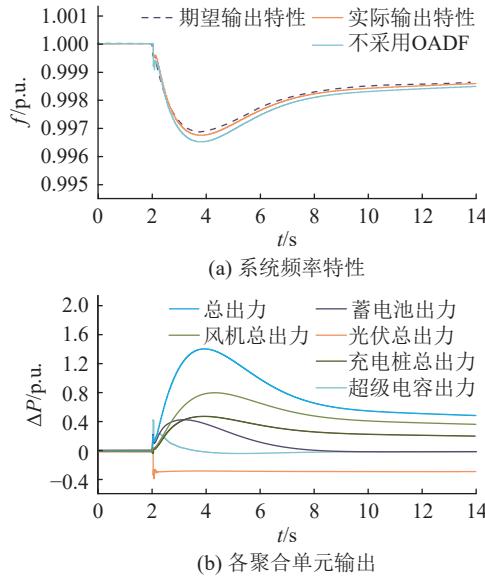


图 8 光伏出力限值波动情况下系统频率特性和各单元的出力情况

Fig.8 System frequency characteristics and output of each unit when the photovoltaic active power capacity limit suddenly decreases

进行自适应处理,则将无法消除较大的频率稳态偏差。图 9 进一步揭示了此协同过程的内部细节,展示了主要调节资源(光伏、充电桩)的功率分配情况以及储能单元的 SOC 变化。

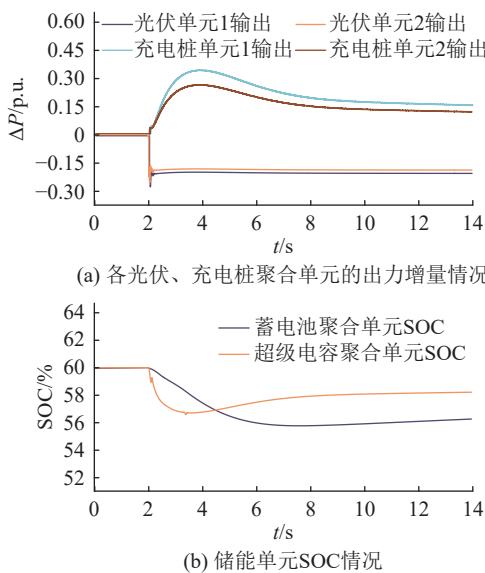


图 9 光伏出力限值波动情况下各光伏、充电桩单元出力增量及储能单元 SOC

Fig.9 Incremental output of each photovoltaic and charging pile unit and SOC of energy storage unit under fluctuating photovoltaic output limits

如图 9 所示,充电桩聚合单元 1 和 2 虽然容量相同,但由于调节成本存在差异,其通过在线自适应动态分解方法得出的输出并不同。综合图 5、图 8 可知,MVPP 整体对外频率响应几乎不受影响。这是由于采用了在线自适应动态分解方法策

略,通过实时测量各可控光伏的备用容量情况在线调整其参与因子,从而协同不同光伏互为补充。同时考虑其他设备容量、响应时间、成本、储能 SOC 等因素,共同实现较为稳定的对外响应效果。由此可见,文中策略能够发挥 MVPP 多类异构资源的优势,在面对分布式能源功率扰动时具有一定的鲁棒性。

4.4 考虑空间分布的策略验证

在实际的配电网中,各分布式资源在地理上是分散的,通过具有不同线路阻抗的电缆相互连接。这种空间分布特性会带来 2 个核心挑战:一是不同位置的资源注入功率对 POC 频率的实际影响是不同的;二是聚合控制指令在下达至不同设备时存在时空差异性。因此,若在控制策略中忽略这种空间拓扑关系,即假设所有设备都集中在一点,必然会导致理论模型与实际物理响应之间产生偏差。文中量化并验证所提策略在处理这一问题上的优越性。

验证文中控制方法在 2.3 节考虑空间分布策略的效果,算例设置同 4.2 节。图 10 对比了考虑与未考虑空间分布的 2 种控制策略下,MVPP 对外有功输出的动态响应情况。

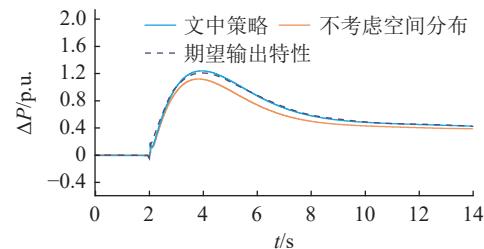


图 10 不同控制策略下 MVPP 对外有功输出情况

Fig.10 MVPP external active power outputs under different control strategies

如图 10 所示,由于各聚合单元的空间分布,预定的频率响应曲线与实际的频率曲线不匹配,说明在期望频率基础上需要考虑线路的阻抗特性。而考虑空间分布的频率响应和实际仿真得出的曲线近似匹配,该曲线的幅值高于未考虑空间分布的曲线。这是因为未考虑空间分布的策略忽略了网络内部的功率损耗,导致其在 POC 的实际输出总是低于控制目标。相比之下,文中所提策略能够计及线路阻抗并主动补偿这部分功率损耗,因此其输出更高,并能实现对参考特性的精确跟踪,更符合高性能控制的实际要求。

这一仿真结果表明,对于具有复杂拓扑的 MVPP,在进行动态辅助服务控制策略设计时,必须考虑其内部的空间分布特性。文中提出的基于空间分布

的解聚合与匹配策略,为实现高精度、高鲁棒性的动态聚合控制提供了有效的解决方案。

5 结论

灵活、鲁棒的聚合控制策略是实现动态调频辅助服务的基础。文中提出的自适应动态频率聚合控制策略,在考虑容量、响应时间、天气、成本等因素的基础上,通过使用 OADF 分解期望特性,并利用 H_∞ 最优鲁棒控制方法为每个设备设计本地反馈控制器,最优地匹配 MVPP 参与动态辅助服务所期望的频率响应特性。且文中策略能够整合不同特性的多类分布式资源,实现互补协同,提高系统性能。仿真结果表明,在负载扰动、新能源出力限额突变时,文中所提控制策略相较于传统方法提高了频率最低值,提升幅度超过 0.02 Hz,改善了电网一次调频特性,并且考虑到实际设备约束和空间分布的因素,使得有功输出曲线能精确满足期望的聚合特性曲线,且有较好的动态性能,为配电网参与调频动态辅助服务提供了有效方案。

文中还存在以下局限:(1)未考虑多个 MVPP 协同的问题,未来的研究需要考虑 MVPP 的性能,以适应更大的电网拓扑,同时针对受到不同类型的干扰进行分析;(2)缺少对多种基于逆变器控制模型的考虑,未能全面计及其他柔性负荷资源(如空调等)。后续还须基于文中策略开展更全面和精细化的研究。

致 谢

本文得到江苏省电力试验研究院有限公司科技项目(DSY202305)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 宋天琦,吕志鹏,宋振浩,等.虚拟电厂规模化灵活资源聚合调控框架研究与思考[J].中国电力,2024,57(1):2-8.
SONG Tianqi, LV Zhipeng, SONG Zhenhao, et al. Research and thinking on the aggregation and dispatching control framework of virtual power plant's large scale flexible resources[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 2-8.
- [2] 汤奕,易俊,薛峰.“双碳”目标下的新型电力系统规划与运行[J].全球能源互联网,2024,7(3):241-242.
TANG Yi, YI Jun, XUE Feng. Planning and operation of new power system under the goal of "dual carbon"[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(3): 241-242.
- [3] 李更丰,孙少华,别朝红,等.面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J].高电压技术,2023,49(10):4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [4] 崔勇,韩一春,郑谦,等.多能联盟低碳运营决策方法研究框架与展望[J].电测与仪表,2024,61(3): 10-19.
CUI Yong, HAN Yichun, ZHENG Qian, et al. Research framework and prospect of multi-energy alliance low-carbon operation decision-making method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 10-19.
- [5] SHEN Y K, WU W C, WANG B, et al. Optimal allocation of virtual inertia and droop control for renewable energy in stochastic look-ahead power dispatch[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1881-1894.
- [6] 刘学成,杨军,申锦鹏,等.基于系统动力学模型的电力系统等效惯量时空演变趋势研究[J].全球能源互联网,2024,7(5): 579-590.
LIU Xuecheng, YANG Jun, SHEN Jinpeng, et al. Analysis of spatiotemporal evolution trend of equivalent inertia in power system based on system dynamics model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(5): 579-590.
- [7] 田涛,黄明,常森伟,等.调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升调度方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(4): 171-181.
TIAN Tao, HUANG Ming, CHANG Senwei, et al. Scheduling method for carrying capacity enhancement of new energy based on nuclear storage coordination under peak shaving-frequency regulation constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(4): 171-181.
- [8] 叶林,王凯丰,赖业宁,等.低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J].电网技术,2023,47(2): 446-464.
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-464.
- [9] 李可雨,王峰,贾红云,等.基于光伏逆变器的快速功率控制系统研究及应用[J].电力工程技术,2023,42(4): 241-247.
LI Keyu, WANG Feng, JIA Hongyun, et al. Research and application of rapid power control system based on photovoltaic inverter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 241-247.
- [10] 尹积军,吴文传.浙江构建新型电力系统的技术路径与实践[J].中国电机工程学报,2023,43(14): 5404-5415.
YIN Jijun, WU Wenchuan. Technical path and practice for constructing the new type power system in Zhejiang Province[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5404-5415.
- [11] 赵熙临,李品,付波.基于频率响应特性的储能辅助电网调频方法[J].电力工程技术,2024,43(1): 41-49, 67.
ZHAO Xilin, LI Pin, FU Bo. Frequency regulation method assisted by energy storage based on frequency response characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024,

- 43(1): 41-49,67.
- [12] 周霞,刘懿诗,戴剑丰,等.考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J].电力系统保护与控制,2023,51(6): 30-44.
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind-power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [13] 程林,王吉利,韩志勇,等.新能源接入对区域系统频率稳定的影响及机组改进控制策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(2): 28-34.
CHENG Lin, WANG Jili, HAN Zhiyong, et al. Impact of new energy access on regional system frequency stability and unit improvement control strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 28-34.
- [14] MOHANDES B, EL MOURSI M S, HATZIARGYRIOU N, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3140-3155.
- [15] 冀肖彤,杨东俊,方仍存,等.“双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J].电力建设,2024,45(2): 37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [16] 潘美琪,贺兴,艾芊,等.新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J].电网技术,2024,48(3): 933-949.
PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospect of distributed energy resource dispatching in new distribution system[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 933-949.
- [17] 张丽娟,保富.含分布式新能源的多虚拟电厂协同运行[J].电测与仪表,2025,62(9): 134-141.
ZHANG Lijuan, BAO Fu. Coordinated operation of multiple virtual power plants integrated with distributed renewable energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 134-141.
- [18] CHEN J R, LIU M Y, MILANO F. Aggregated model of virtual power plants for transient frequency and voltage stability analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4366-4375.
- [19] MARINESCU B, GOMIS-BELLMUNT O, DÖRFLER F, et al. Dynamic virtual power plant: a new concept for grid integration of renewable energy sources[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 104980-104995.
- [20] 戴睿鹏,窦晓波,喻洁,等.含光储充的配网虚拟电厂二次调频随机模型预测控制策略[J].电网技术,2024,48(8): 3228-3237.
DAI Ruipeng, DOU Xiaobo, YU Jie, et al. Secondary frequency control strategy for photovoltaic-storage-charging distribu-
- tion-level virtual power plant based on stochastic model predictive control[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3228-3237.
- [21] 蔡光宗,王伊晓,袁智强,等.基于一致性算法的虚拟电厂调度指令动态跟踪策略[J].电力建设,2024,45(5): 71-79.
CAI Guangzong, WANG Yixiao, YUAN Zhiqiang, et al. Consensus-based dynamic dispatching instruction tracking strategy for virtual power plant[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 71-79.
- [22] 李晓舟,秦文萍,景祥,等.计及不确定风险和多主体协同的虚拟电厂参与主辅市场联合优化策略[J].电网技术,2024,48(11): 4553-4567.
LI Xiaozhou, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Joint optimization for virtual power plant participating in main and auxiliary markets considering uncertain risks and multi-agent coordination[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4553-4567.
- [23] 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.
- [24] ZHONG W L, KİRÇİ T, MILANO F. On the impact of topology on the primary frequency control of virtual power plants[C]//2021 IEEE Madrid PowerTech. Madrid, Spain. IEEE, 2021: 1-6.
- [25] ZHONG W L, CHEN J R, LIU M Y, et al. Coordinated control of virtual power plants to improve power system short-term dynamics[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1182.
- [26] YANG X Y, LIU Y X, XING G T. Analysis of wind farm participation in the frequency regulation market considering wind power uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106946.
- [27] PILTAN G, PIROUZI S, AZARHOOSHANG A, et al. Storage-integrated virtual power plants for resiliency enhancement of smart distribution systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105563.
- [28] 虞临波,寇鹏,冯玉涛,等.风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(12): 36-43.
YU Linbo, KOU Peng, FENG Yutao, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36-43.
- [29] 汤波,杨鹏,余光正,等.基于负荷峰谷耦合特性的中压配电网供区优化方法[J].中国电机工程学报,2022,42(19): 7051-7063.
TANG Bo, YANG Peng, YU Guangzheng, et al. Power supply area optimization method of medium voltage distribution network based on load peak valley coupling characteristics[J].

- Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7051-7063.
- [30] GONG X, WANG X Z. A novel Koopman-inspired method for the secondary control of microgrids with grid-forming and grid-following sources[J]. *Applied Energy*, 2023, 333: 120631.
- [31] ZHOU J, XING L T, WEN C Y. Adaptive control of dynamic systems with uncertainty and quantization[M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [32] MACHOWSKI J, LUBOSNY Z, BIALEK J W, et al. Power system dynamics: stability and control[M]. John Wiley & Sons, 2020.
- [33] ZHAO P, SNYDER S, HOVAKIMYANA N. Robust adaptive control of linear parameter-varying systems with unmatched uncertainties[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2024, 47(10): 2085-2102.
- [34] KUNDUR P. Power system stability[M]//Power System Stability and Control. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [35] IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group. IEEE PES test feeder[EB/OL]. [2024-04-23]. <http://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/>.
- [36] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Grid Operation and Control. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

作者简介:



肖小龙

肖小龙(1990),男,硕士,高级工程师,从事电力调度、配电网运行等工作(E-mail: ethan518@126.com);

史明(1986),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力电子技术、配电自动化工作;

吴凡(1994),男,硕士,工程师,从事电力系统优化运行工作。

Dynamic frequency aggregation control strategy of meshed distribution virtual power plant

XIAO Xiaolong^{1,2}, SHI Mingming^{1,2}, WU Fan^{1,2}, LU Xiaoxing^{1,2}, GUO Ning^{1,2}, GUO Jiahao^{1,2}

(1. Jiangsu Electric Power Test Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: To fully leverage the characteristics of various distributed resources and the controllability of distribution grids for delivering higher-performance and dynamic ancillary services, a dynamic frequency aggregation control method for meshed distribution virtual power plants (MVPP) is proposed. Firstly, the overall architecture of MVPP is defined, and a frequency control model capable of aggregating the dynamic characteristics of its internal distributed resources for primary frequency regulation scenarios is established. Subsequently, an adaptive dynamic frequency matching control approach is employed to address the control design challenge of the dynamic frequency aggregation model. The desired characteristics are decomposed through online adaptive approach, and a local feedback controller is designed for each device using an H_∞ optimal robust control method to precisely and dynamically match the decomposed desired characteristics for primary frequency regulation. The simulation results verify the effectiveness of the proposed control method, demonstrating that it can significantly improve the primary frequency regulation characteristics of the system through the complementation of various resources under scenarios such as load disturbance and new energy output fluctuations. The proposed strategy offers a new solution for spatially distributed aggregation units to participate in dynamic frequency regulation auxiliary services.

Keywords: virtual power plant; distribution network; primary frequency control; robust control; distributed generator; adaptive control

(编辑 陈雯嘉)