基于目标级联分析的异构虚拟电厂频率与电量协同调度模型

王 滔[1]，李江南[2]，赵文猛[1]，欧鸣宇[2]，毛 田[1]，蒋季儒[2]，郭 烨[3]
（1.南方电网科学研究院有限责任公司，广东 广州 510530；2.深圳供电局有限公司，广东 深圳 518000；3.清华大学深圳国际研究生院，广东 深圳 518000）

摘 要：在全球能源结构转型与可再生能源快速发展的背景下，如何实现异构虚拟电厂的高效聚合与优化调度成为一项重要挑战。通过改进聚类算法与控制系统的深度集成，文章提出了一种基于目标级联分析法的异构虚拟电厂频率与电量协同调度模型。首先，引入学习机制优化光伏-电池储能系统的聚类过程，满足大量电源的能量容量需求；然后，设计了光伏-电池储能系统的分布式控制系统，并在 IEEE 13 节点分布式光伏电源与储能系统上进行了验证。实验结果表明，与传统调度方法相比，该模型调度效率提高了 18%，电压偏差控制在 1%以内，频率偏差维持在 50 Hz 左右；同时，电池充电状态的分布均衡地维持在 30%~90%，实现了光伏与储能资源的高效协同调度。与未采用学习机制的方法相比，该模型具备较强的实用性和拓展潜力，为虚拟电厂的实际应用提供了新路径。

关键词：虚拟电厂；聚类算法；频率恢复；电池充电状态
中图分类号：TK89；TK51；TM73 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0122-09

0 引言

在全球能源结构转型和可再生能源快速发展的背景下，虚拟电厂（Virtual Power Plants，VPPs）作为一种新型的电力系统运行和管理方式，因其能够集成分布式发电资源、储能系统和需求响应而受到广泛关注[1,2]。通过虚拟电厂的优化调度和运行，能够提高电网的灵活性和可靠性，尤其是在应对可再生能源波动性和不确定性方面展现出巨大潜力[3,4]。近年来，随着高比例可再生能源接入以及电网调控需求的增长，虚拟电厂的优化调度已成为学术界和工程实践的重要研究领域[5]。

目前，虚拟电厂面临着异构性资源聚合、能量容量平衡及动态优化调度等技术瓶颈。已有研究为虚拟电厂优化调度的理论发展和实践应用奠定了基础。文献[6]结合博弈论与强化学习算法，提出一种含虚拟惯量的虚拟电厂 Nash-Q 强化学习调度策略，解决了具有高随机性和不确定性的分布式电源协调优化调度的问题。文献[7]提出考虑不确定性的虚拟电厂低碳经济调度方法，可有效提高新能源渗透率并降低系统碳排放。针对风险管理问题，文献[8]基于最小-最大后悔值法建立共享型虚拟电厂风险调度模型，促进了新能源消纳与电网区域供需平衡。文献[9]提出基于二阶随机动力学的多虚拟电厂自趋优能量管理策略，旨在提升虚拟电厂应对其他主体策略变化时的自治能力。在资源聚合方面，文献[10]提出了新型配电网多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行方法，提升了分布式资源参与电网运行的灵活性。文献[11]对基于虚拟电厂的电能共享交易机制进行了研究，所提调度方法与交易机制能够提高用户侧资源利用效率。在优化算法领域，文献[12] 提出了基于灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术，有效降低了碳排放量和净成本。文献[13]结合碳捕集技术与需求响应机制，利用蚁狮优化算法实现了虚拟电厂的灵活低碳运行。针对多目标优化问题，文献[14]采用可调不确定集合来描述风电、电负荷及热负荷，建立了虚拟电厂多目标日前鲁棒优化调度模型。虚拟电厂优化调度研究主要聚焦于多类型资源协调与聚合、

收稿日期：2024-12-30。
基金项目：中国南方电网有限责任公司科技项目(SZKJXM20220036/090000202203010309012 83)。
作者简介：王 滔(1991-)，男，硕士，工程师，研究方向为虚拟电厂、电力系统优化。E-mail：wangtao@csg.cn

低碳经济调度及动态环境下的自主优化策略。现有研究不仅涵盖了理论方法的创新,也逐步向实际应用场景延伸,为解决虚拟电厂调度中的复杂性与不确定性问题提供了多样化的解决路径。

虽然虚拟电厂已引入调度强化学习等技术,但在频率恢复与电量支撑的协同优化方面仍存在不足,尤其缺乏针对级联调度的系统性研究。本研究基于目标级联分析法提出了一种面向异构虚拟电厂的频率恢复(Virtual Power Plant Frequency Recovery, VPPFR)与电量支撑级联调度模型。模型通过学习机制动态调整光伏-电池储能系统(Photovoltaic-Battery Energy Storage System, PVpBESSs)的聚类过程,以同时满足频率恢复和电量支撑(Bulk Power Supply in Virtual Power Plants, VPPBS)的能量容量需求,并显著提升调度效率与聚类精度。在控制系统设计上,模型分层次协调频率恢复、电量支撑与电池充电状态(State of Charge, SOC)的动态平衡,增强了系统在复杂动态环境下的响应能力与稳定性。通过在IEEE 13节点分布式光伏电源与储能系统上的实验验证,表明该模型在提高调度效率、降低运营成本、稳定电网频率与电压方面具有显著的优势。

1　基于聚类算法的虚拟电厂级联调度架构

虚拟电厂的级联调度架构旨在通过优化异构资源的协调和动态管理,实现频率恢复和电量支撑的高效调度。本节围绕虚拟电厂的频率与电量协同调度目标,探讨其级联调度架构的关键设计与实现。

1.1　级联调度架构概述

在虚拟电厂级联调度中,研究对象分为两种类型:一种是用于提供电力需求的高频部分,称为VPPFR;另一种是用于提供大量电力需求的低频部分,称为电量支撑(VPPBS)。调度架构由以下两部分组成。

①频率恢复层:VPPFR通过动态调节光伏-电池储能系统的频率输出,实现对微电网频率的快速恢复。

②电量支撑层:VPPBS通过分布式控制策略向微电网注入大量低频电力,满足系统功率需求并实现电池状态的动态平衡。

1.2　级联调度的关键模块

虚拟电厂的级联调度架构主要由频率恢复模块和电量支撑模块组成,这两个模块在设计上相互协作,共同实现系统的调度目标。频率恢复模块通过PVpBESSs的灵活控制实现微电网的频率稳定,包括动态调整PVpBESSs的输出频率至额定值,确保PVpBESSs的输出电压维持在设定范围内,并通过协调多个PVpBESSs的充放电过程,维持电池组的SOC在合理范围内。通过这种多目标的动态控制,频率恢复模块不仅能够快速响应外部干扰,还能有效提升系统的运行可靠性。

电量支撑模块用于满足系统的大功率需求。该模块通过分布式控制策略,将系统负荷按比例分配至各PVpBESSs,以确保大功率需求的平稳供应。同时,分布式控制策略还用于调节电压以维持系统的稳定性。电量支撑模块通过优化SOC分布延长储能设备的使用寿命,并在运行过程中动态平衡功率与储能状态,从而提升系统整体的运行效率和稳定性。

1.3　控制系统的实现

基于目标级联分析的控制系统为频率恢复和电量支撑模块提供了强大的技术支持,其核心在于通过分布式算法动态调整各模块的运行状态,进而实现协调优化。控制系统首先将目标级联分析方法引入调度策略中,通过分层次的控制架构,实现频率恢复与电量支撑的协同优化。在具体的应用中,系统利用实时反馈机制,根据当前负载需求与资源状态,动态调整PVpBESSs在不同模块间的资源分配比例,从而确保调度过程的高效适应性。

此外,该控制系统在频率恢复、电量支撑和SOC平衡3层目标之间实现了合理调配。频率恢复模块通过快速调节PVpBESSs的频率和电压输出,提高了系统应对动态变化的能力;电量支撑模块则通过优化大功率输出与储能状态之间的关系,确保了系统的稳定性和长期运行能力。通过这一多层次的优化框架,控制系统不仅提升了调度的精度与效率,还显著降低了资源消耗与运行成本。

1.4　聚类算法学习机制

本研究对分布式动态聚类算法[15,16]进行了改进,使其适用于将PVpBESSs聚类到异构虚拟电厂,改进的关键在于引入特征状态的选择与学习机制。其中,将特征状态应用于聚类算法中,可以

确定每个PVpBESSs归属于哪个虚拟电厂。选取PVpBESSs的电池容量及业主提供电池以满足高频电力需求的意愿作为特征状态,并通过用户愿意为该服务支付的价格来预测其意愿。聚类算法可以简单概括为式(1)~(3):

$$\dot{\overline{x}}_i^{\text{cstr}k}=\dot{x}_i+k_{\text{cstr}}\sum_{l\in N_i}\left[a_{il}(\overline{x}_l^{\text{cstr}k}-\overline{x}_i^{\text{cstr}k})\right] \tag{1}$$

$$\dot{\overline{x}}_i^{\text{cstr}j}=\frac{1}{|N_i|}\sum_{l\in N_i}\left[a_{il}\dot{\overline{x}}_l^{\text{cstr}j}\right]+k_{\text{cstr}}\sum_{l\in N_i}\left[a_{il}(\overline{x}_l^{\text{cstr}j}-\overline{x}_i^{\text{cstr}j})\right],\quad j\neq k \tag{2}$$

$$x_i\in\left\{k\text{-thcluster}\mid\overline{x}_l^{\text{cstr}k}=\underset{\overline{x}_i^{\text{cstr}k},k\in\{1,\cdots,M\}}{\operatorname{argmin}}\left[\lambda\left(x_i-\overline{x}_i^{\text{cstr}k}\right)\right]\right\},\quad \lambda=\text{diag}\{\lambda_l\} \tag{3}$$

式中:x_i为确定的特征状态集群;$x_i^{\text{cstr}j}$为特征的平均估计代理i观察到的第j类中的簇,$i=1,\cdots,N$,$j=1,\cdots,M$,N为代理的个数,M为簇数;k_{cstr}为平均估计增益;l为特征状态,$l=1,\cdots,n$;N_i为节点i的邻居;$|N_i|$为第i个代理的邻居个数;a_{il}为连接节点i和节点l的有向通信链路所对应的常数正权。

通过引入学习机制增益λ_l对式(3)进行了修正。通过对学习机制增益λ_l和平均估计增益k_{cstr}进行建模来调整聚类过程。k_{cstr}越大,聚类算法的收敛速度越快。

通过调整λ的调谐方法,可以动态满足VPPBS所需的总能量容量。例如,当λ增加时,如果无法满足所需的总能量容量条件,或λ达到设定的上/下限,λ将切换为减小方向。该更新规则引入了一种“加权机制”,旨在优化VPPBS的能量容量分配,以更好地满足系统需求。

2 基于目标级联分析法的控制系统

本文提出了一种基于目标级联分析法的控制系统,将频率恢复、电压恢复和SOC平衡的二次电平控制系统与聚类算法相结合,针对不同控制目的,虚拟电厂中的PVpBESSs采用了不同的控制结构。在VPPFR中,电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)采用基于下垂控制的初级控制层,并参考分布式二级控制系统的策略,通过提供电力需求的高频成分来维持频率和电压稳定。在VPPBS中,BESS注入低频电力,采用电流注入控制方式,并通过分布式二次电平控制系统提供的功率参考以及局部电压恢复控制实现无功功率参考,保证大功率注入和SOC平衡。

2.1 虚拟电厂参与级联调度的动态过程分析

根据图1所示的系统框架,虚拟电厂在级联调度中主要分为3个层次:初级控制、次级控制与高级调度控制。各层次协同作用以实现频率、电量需求和电压的动态控制。

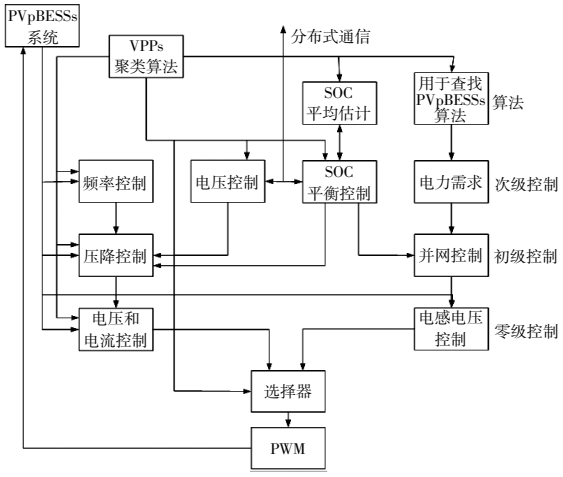


图1 基于目标级联分析法的控制系统组成

Fig.1 Composition of control system based on target cascade analysis method

初级控制聚焦于系统快速动态响应,包括频率控制、压降控制、电压和电流控制等功能模块。这些模块通过分布式通信技术接收虚拟电厂调度信号,并通过对并网逆变器的控制实现系统的短时电力平衡与电压支撑。例如,在负荷突变或分布式电源波动时,初级控制模块迅速调整储能设备的输出,抑制频率与电压的偏差,保证电力系统的瞬态稳定性。

次级控制关注储能设备的能量平衡与协调调度,核心为基于SOC的平衡算法与并网模式选择策略。SOC平衡控制通过分布式通信获取储能设备的充、放电状态,综合评估其运行工况,制定平衡能量的优化策略,从而避免单个储能设备过充或过放。此外,次级控制还结合电力需求预测数据,进一步制定电压补偿与功率分配方案,为上层调度提供支持。

高级调度基于虚拟电厂聚类优化算法对系统的全局资源进行优化配置,包括储能设备的协同调度、分布式电源的出力优化及负荷需求的动态调整。该层级主要通过分布式通信与分布式储能

群交互,平衡不同设备之间的能量分配,确保系统在满足负荷需求的同时实现频率与电压的稳定。

虚拟电厂在级联调度框架下的动态响应包括频率恢复和电压控制两部分。初级控制通过频率控制模块响应负荷突变引起的频率偏差。当负荷增加导致系统频率下降时，储能设备在频率控制信号的引导下快速释放能量；反之，当频率过高时,储能设备通过吸收多余能量对频率进行调节。此外,次级控制通过 SOC 平衡算法动态调整储能设备的出力分布,避免单个储能单元因快速充、放电而达到其容量限制。虚拟电厂通过并网逆变器和分布式储能设备实现电压的动态控制。初级控制通过快速调节并网电压实现局部补偿，而次级控制则根据电网状态与负荷波动动态调整储能设备输出电压的参考值。此外,虚拟电厂的调度算法基于设备状态与电网需求优化分布式储能设备的运行模式,进一步实现电压的全局优化。

在级联调度框架中，虚拟电厂通过以下方式实现频率、负荷需求与电压的动态控制。

①频率控制

虚拟电厂通过分布式储能设备快速响应系统频率波动，在短时间内释放或吸收功率以平衡负荷变化。同时,高级调度层结合分布式通信技术对储能设备的备用容量进行动态调整，增强系统频率的稳定性。

②负荷需求控制

虚拟电厂通过聚类调度算法动态整合分布式储能设备与分布式电源,优化充、放电计划与负荷需求的匹配。在次级控制中,SOC 平衡算法基于储能设备的运行状态与负荷需求预测，制定逐步趋优的能量管理策略,提升资源的利用率。

③电压控制

虚拟电厂通过储能设备参与电压支撑，初级控制实现快速响应,次级控制优化电压补偿策略,高级调度实现全局优化。在全局范围内综合考虑设备群的运行状态与电网运行条件，制定分层调度策略,进一步提升系统的电压稳定性。

2.2　VPPFR 中 PVpBESSs 控制系统

VPPFR 中的 PVpBESSs 控制系统由两个控制层组成:一级下垂控制和分布式二级电平控制。VPPFR 中的 PVpBESSs 通过提供电力需求的高频分量来恢复微电网的频率和电压。

修改后的下垂控制为

$$\begin{cases}\omega_i=\omega_i^{\mathrm{ref}}-m_i p_i\\ v_i=v_i^{\mathrm{ref}}-n_i q_i\end{cases},\ i\in F \tag{4}$$

式中:ω_i和 v_i分别为电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)频率和 d 轴输出电压(假设 q 轴电压保持为 0);ω_i^{ref}和 v_i^{ref}分别为 VSC 频率、一级降压控制参考;m_i和 n_i均为下垂系数;p_i和 q_i分别为实测的有功功率和无功功率;F 为 VPPFR 中 PVpBESSs 的集合。

2.3　VPPBS 中 PVpBESSs 控制系统

在 VPPBS 中,PVpBESSs 的控制系统分为主控制层和次控制层。次控制层实现功率注入控制。主控制层提供了系统所需的大量(低频)实际功率注入参考值和 SOC 平衡功率参考值。

①一级功率注入控制

通过计算电感电流参考值 $i_{\mathrm{Ld}i}$和 $i_{\mathrm{Lq}i}$来实现功率注入控制,从而实现本地电流控制。

$$i_{\mathrm{Ld}i}=\frac{v_{odi}P_i^{\mathrm{ref}}-v_{oqi}Q_i^{\mathrm{ref}}}{v_{odi}^2-v_{oqi}^2} \tag{5}$$

$$i_{\mathrm{Lq}i}=\frac{v_{oqi}P_i^{\mathrm{ref}}-v_{odi}Q_i^{\mathrm{ref}}}{v_{odi}^2-v_{oqi}^2} \tag{6}$$

式中:P_i^{ref},Q_i^{ref}分别为实际功率基准值和无功功率基准值;v_{odi},v_{oqi}分别为 d 轴和 q 轴的输出电压。

实际功率参考值 P_i^{ref}由二级电平控制提供,作为所需的批量(低频)功率注入 $P_{\mathrm{B}i}^{\mathrm{blk}}$和 SOC 平衡功率命令 $P_{\mathrm{B}i}^{\mathrm{SOC}}$的总和。

$$P_i^{\mathrm{ref}}=P_{\mathrm{B}i}^{\mathrm{blk}}+P_{\mathrm{B}i}^{\mathrm{SOC}} \tag{7}$$

Q_i^{ref}由本地输出电压恢复控制设定。

②单个 PVpBESSs 的功率注入信号

为了实现 VPPBS 中 PVpBESSs 的总批量(低频）功率需求的比例功率共享，必须确定每个 PVpBESSs 的功率注入信号 $P_{\mathrm{B}i}$(块),作为其总批量(低频)功率需求的份额。

采用分布式平均估计方法得到总电力需求的平均估计值$\overline{\dot{p}_i}$:

$$\dot{\overline{p}}_i=\dot{p}_{di}+k_p\sum_{j\in N_i}[a_{ij}(\overline{p}_j-\overline{p}_i)],\ i\in V \tag{8}$$

式中:p_{di} 为本地电力需求,$p_{di}=p_{\mathrm{LD}i}-p_{\mathrm{PV}i}$,$p_{\mathrm{LD}i}$ 为本地负荷需求功率,$p_{\mathrm{PV}i}$ 为本地光伏输出功率;a_{ij} 为电力需求系数。

总功率需求为 $p^{\Sigma}=p_iN_i$,其中 N_i 为第 i 个 PVpBESSs 识别出的 PVpBESSs 总数。

以如下分布式方式提供 VPPBS 中 PVpBESSs VSC 的比例体积(低频)功率参考 P_{Bi}(块)。VPPBS 中的 PVpBESSs 根据其下垂系数 m_i 按比例共享总功率需求 p^{Σ} 的大块(低频)分量 P_{Bi}(块),表示为 $\theta_i=1/m_i$。为了得到 VPPBS 中PVpBESSs 下垂系数反转的估计平均值,设置了如下分布方法:

$$\dot{\overline{v}}_{Bi}=v_i+k_v\sum_{j\in N_i}[a_{ij}(\overline{v}_{Bj}-\overline{p}_{Bi})],\ i\in B \tag{9}$$

$$\overline{v}_{Bi}=\frac{1}{|N_i|}\sum_{l\in N_i}\overline{v}_{Bi}+k_v\sum_{j\in N_i}[a_{ij}(\overline{v}_{Bj}-\overline{p}_{Bi})],\ i\in F \tag{10}$$

式中:v_{Bi} 为 VPPBS 中 PVpBESSs 下垂系数反转的估计平均值。

VPPBS 中的每个 PVpBESSs 应用式(9)更新平均估计值,VPPFR 中的 PVpBESSs 应用式(10)将平均估计数据传输给其邻居。

③无功功率控制

设置无功功率基准,通过本地 PI 控制器将输出电压恢复到额定值:

$$Q_i^{\mathrm{ref}}=k_v(v_{\mu g}-v_i)+k_i\int(v_{\mu g}-v_i) \tag{11}$$

式中:k_v,k_i 分别为局部电压恢复的比例、积分控制增益;v_i 为第 i 个节点或设备(如 PVpBESSs)的电压;$v_{\mu g}$ 为虚拟电厂或微电网的全局目标电压值(额定电压)。

每个 PVpBESSs 都有作为 VPPFR 或 VPPBS 成员的所有控制系统。聚类算法确定每个代理(PVpBESSs)属于哪个虚拟电厂。

VPPFR 中 PVpBESSs 的控制系统包括下垂控制、频率恢复、电压恢复、SOC 平衡。VPPBS 中的 PVpBESSs 控制系统辅助频率恢复数据传输、辅助电压恢复数据传输、辅助 VPPFR 传输 SOC 平衡数据,响应本地大功率需求、SOC 平衡和本地电压恢复。PVpBESSs 计算响应方程并将结果数据传输到其他虚拟电厂的控制系统中,辅助方程不用于 PVpBESSs 自身控制系统的更新。辅助传输允许控制系统完全分布,能够适应虚拟电厂的变化。

2.4 基于目标级联分析法的学习机制设计

通过学习机制优化虚拟电厂储能子系统的总能量容量(即所有 BESS 的能量容量之和)。归一化 VPPBS 的总容量为 E^B。第 i 次 PVpBESSs 对 E^B 的估计可定义为 E_i。若 VPPBS 中第 i 个 PVpBESSs 归一化容量的平均估计为 E^B,则 VPPBS 的总容量为

$$E^B=E_i^{\mathrm{cstr}B}\times N_{Bi} \tag{12}$$

式中:N_{Bi} 为 VPPBS 电池总数。

假设 VPPBS 所需的总容量为 E^B,那么,如果 $E_i<E^B$,则式(3)中的学习机制增益 λ_l 将被迭代更新,即在每个采样时间,基于当前 VPPBS 的总能量容量反馈 λ 递增或递减。反馈决定了 λ 的更新规则,如果 λ 的变化导致 VPPBS 总能量容量下降,则 λ 的更新规则将反转,直到 VPPBS 总能量容量满足要求。

通过目标级联的动态调整策略,使系统能够在异构资源间协调分布,逐步接近目标容量,实现高效的能量调度与优化。

3 基于目标级联分析法的虚拟电厂的实验与结果分析

本文通过实时数字模拟技术在 IEEE 13 节点分布式光伏电源和储能系统上对提出的分布式聚类算法和控制系统进行了验证。电力系统额定电压为 4.16 kV,VSC 的输出额定电压为 415 V,VSC 通过变压器与电力系统连接。标称频率为 50 Hz。节点 611,633,646,652,684,680 的电阻性荷载均为 7.5 kΩ,节点 634,645,671 的电阻性荷载均为 15 kΩ,节点 675,692 的电阻性荷载均为 5 kΩ。

本文设置两个案例研究。案例 A:未采用学习机制的虚拟电厂聚合;案例 B:采用学习机制的虚拟电厂聚合。

3.1 案例 A

未采用学习机制的虚拟电厂聚合分为两步:①选择聚类个数 M=3,运行聚类算法;②选取均值(聚类中心)最接近原点的虚拟电厂聚类为 VPPFR,其余两个虚拟电厂聚类为 VPPBS。

将 N 个 PVpBESSs 初始化为 M 个集群,并运行聚类运算。找到集群后,从 M 个集群中选择 1 个作为 VPPFR,其余(M−1)个集群组成 VPPBS。

电池的能量容量为 20~60 kW·h。用户提供高频部分电力需求的意愿各不相同。如前所述,选择电池能量容量和用户意愿作为聚类算法的特征状态,其意愿表示为用户希望从电力系统运营商处获得高频电力需求供给服务的价格。

聚类算法将 PVpBESSs 分成 3 个簇，然后选择距离原点(提供高频功率的平均意愿最高,电池平均能量容量最小）最短的聚类作为 VPPFR,其他聚类作为 VPPBS。

图 2 显示了在虚拟电厂内维持的电池 SOC 的平衡状态。PVpBESSs（1,2 和 4）聚类为 VPPFR，其他聚类为 VPPBS。PVpBESSs4 在第 3 小时从 VPPFR 移动到 VPPBS。VPPFR 的 PVpBESSs 提供功率需求的高频部分,VPPBS 的 PVpBESSs 提供大量(低频)功率,使电压和频率恢复到标称值。

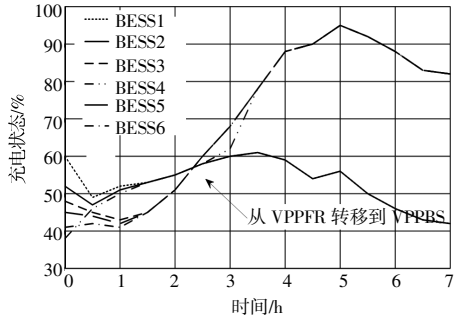


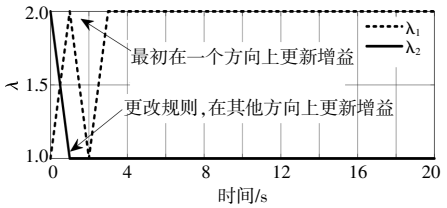
图 2　案例 A 的电池充电状态

Fig.2 A battery state of charge in case A

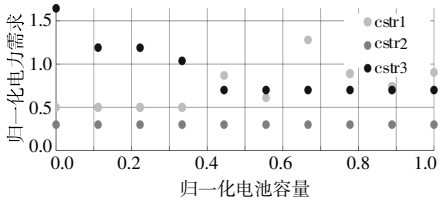
3.2　案例 B

采用学习机制，通过 λ 进行调谐,PVpBESSs 在簇中的隶属度根据 VPPBS 当前总能量容量的反馈而变化。

采用学习机制的聚类结果如图 3 所示。VPPBS 中所需的归一化电池总容量设为 2.75。首先，通过学习机制在一个方向上调整了聚类算法的增益,选定 Cstr3 为 VPPFR,其包含 7 个电池,选定 Cstr1 和 Clstr2 为 VPPBS,共包含 2 个电池。由于当前 VPPBS 的能量容量低于 2.75,因此调整



(a)λ 随时间变化曲线



(b)按聚类归一化电力需求曲线

图 3　学习机制在分布式聚类算法中的示意图

Fig.3 Schematic diagram of the learning mechanism in distributed clustering algorithm

增益直到选择新的 Cstr3 作为 VPPFR（3 个电池),并选择新的 Cstr1 和 Cstr2 作为 VPPBS(6 个电池)。

在案例 B 中,电池充电状态、光伏的总输出功率、储能系统输出功率、虚拟电厂的频率分别如图 4~6 所示。

由图 4 可以看出，本文所提模型有效实现了电池状态的动态调整,各电池的 SOC 曲线趋于平稳,波动值为 30%~90%,符合分布式能源利用的最优目标。图 5 表明,在案例 B 中,光伏总输出功率和 VPPBS 输出功率可根据负荷需求精准匹配,系统输出功率迅速趋于平稳，波动明显小于传统调度方法。图 6 中的 VSC 频率曲线表明,采用虚拟电厂级联调度后,频率变化幅度显著降低,稳定性增强。特别是在出现负荷波动时,虚拟电厂能够在更短的时间内进行响应,将频率控制在(50±0.5) Hz。与传统调度方法相比,虚拟电厂不仅提高了频率恢复速度,也减少了频率波动幅度,从而保证了系统的稳定运行。电压曲线显示,虚拟电厂通过调节储能电池的充、放电状态以及光伏电源的功率输出,实现了电压的精准控制,将电压波动控制在 1%以内,符合电力系统对电压稳定性的要求。

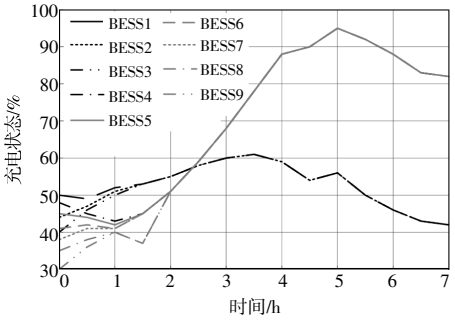
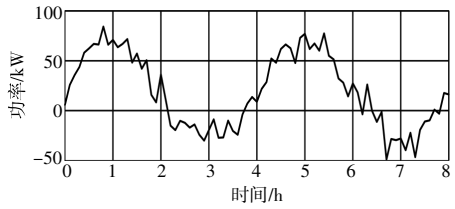
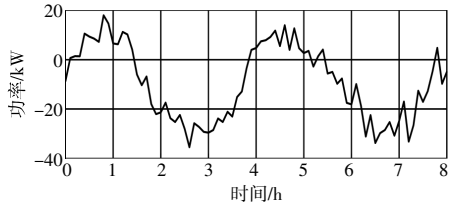


图 4　案例 B 的电池充电状态

Fig.4 Battery state of charge of case B



(a)光伏的总输出功率



(b)VPPBS 的输出功率

图 5 案例 B 光伏的总输出功率以及 VPPBS 的输出功率

Fig.5 Case B total output power of PV and output power of VPPBS

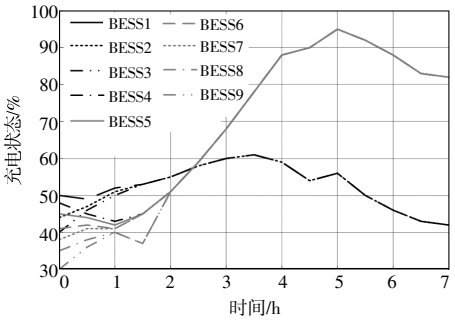


图 6 虚拟电厂频率响应

Fig.6 VPPs frequency response

通过系统功率平衡度、响应时间、资源利用率和经济效益等参数对系统调度效率提升的量化指标进行评估。利用系统功率平衡度衡量资源调度的精准度,优化调度后,虚拟电厂的资源调度有效降低了功率偏差,提高了功率平衡效率。响应时间反映了系统在电网频率或电压波动时的响应速度,优化调度使虚拟电厂能够更快速、精准地进行负荷调节、频率恢复和电压控制。资源利用率则衡量各类资源(如储能和可再生能源)的使用效率,优化调度提高了资源利用率,减少了资源的闲置或浪费。经济效益则通过比较传统调度和优化调度的运行成本差异,评估调度效率的提升对整体经济性的贡献。结合图 2 与图 4 可知,系统调度效率提升了 18%。

3.3 虚拟电厂级联调度与优化调度对电力系统性能的影响

基于案例 A 与案例 B 的实验结果,结合虚拟电厂的级联调度,进一步探讨虚拟电厂在电力系统调度中的实际应用,特别是在频率恢复、电量需求、电压控制方面的表现和提升。通过分析虚拟电厂的级联调度与优化策略对电力系统的动态响应、调度效率以及资源利用率的影响,能够更加深入地理解其在实际电网中的作用。

引入虚拟电厂级联调度后,系统频率的控制精度显著提高,频率恢复时间明显缩短。在案例 A 中,采用传统调度方法时,频率波动较大,恢复至标称频率 50 Hz 的过程相对较慢。在案例 B 中,引入学习机制后的聚类算法与虚拟电厂协同调度,可以实现更精确的频率恢复。具体来说,虚拟电厂根据负荷变化实时调整各类分布式资源的功率输出,尤其是在储能单元和光伏输出功率之间实现了更紧密的协同,从而有效地避免了频率偏差过大。

在案例 B 中,通过引入虚拟电厂的级联调度,系统的电压稳定性得到了显著提升。采用传统调度方法时,由于光伏发电具有波动性,尤其是在白天光照条件发生变化时,因此系统电压波动较为明显。通过虚拟电厂的级联调度,系统能够在光伏发电波动时通过储能系统进行有效的电压补偿,同时在负荷变化时提供快速的电压调节响应,从而保持电网的电压稳定。通过引入虚拟电厂的级联调度,系统的资源利用率和调度效率得到了显著提高。在案例 A 中,采用聚类算法将电池按需求意愿与容量进行划分,虽然系统能够保持电池的充电状态平衡,但在频率与电压调节的响应时间上有所延迟。相比之下,案例 B 中的学习机制和虚拟电厂级联调度进一步优化了电池的能量分配和光伏电源的输出功率,使得系统在资源利用上更加高效,电池状态的波动保持在 30%~90%,符合最优的分布式能源利用目标。从图 5 可以看出,光伏的总输出功率和 VPPBS 的输出功率在案例 B 中能够精准匹配负荷需求,而在传统调度中,功率输出波动较大,导致资源的浪费和调度效率低下。虚拟电厂通过实时优化调度,使得光伏和储能系统的功率输出更加平稳,提升了整体调度效率。

4 结束语

本文提出了一种基于目标级联分析法的虚拟电厂优化调度模型,解决了异构虚拟电厂在资源

聚合与调度优化中存在的效率低下问题。通过引入学习机制改进聚类算法，模型能够在动态环境中实时调整 PVpBESSs 的聚类,实现频率恢复、电压稳定以及电池充电状态平衡。与传统调度方法相比,模型调度效率提升了 18%,并显著优化了系统运行指标。

①电压偏差稳定控制在±1%的范围内，保障了电力系统运行的稳定性。

②系统输出频率稳定在 50 Hz，未出现明显偏移。

③电池 SOC 的动态调节更加均衡，维持在 30%~90%,有效延长了储能设备的使用寿命。

因此,采用本文所提策略后,光伏发电与储能资源实现了精准的功率输出匹配，系统输出功率快速趋于稳定，显著提升了能源利用效率和系统灵活性。

未来研究将继续探讨模型在不同电力市场规则与政策下的扩展性，进一步优化聚类算法与分布式控制策略，以支持更多可再生能源的高效整合。通过进一步改进,该模型将为构建灵活、高效、清洁的电力系统提供坚实的基础。

参考文献:

[1] 黎静华,朱梦姝,陆悦江,等.综合能源系统优化调度综述[J].电网技术,2021,45(6):2256-2272.

[2] 孙秋野,钱本华,胡杰.从智能电网到新型电力系统[J].沈阳工业大学学报,2024,46(5):579-589.

[3] 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.

[4] 康利改,袁小雪,曹紫霖,等. 储能协调下负荷密集区分布式综合能源系统优化研究[J].中国测试,2024,50(6):167-175.

[5] Zhenlan D,Chunyan Z,Chuanxu D,et al.Multitime scale economic regulation model of virtual power plant considering multiple uncertainties of source, load and storag [J].Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering,2024,24(2):935-953.

[6] 王鹤霏,蔡国伟,吴同,等.基于供用能双侧多主体博弈互动的综合能源系统优化调度策略[J].东北电力大学学报,2024,44(1):83-93.

[7] 王琦,董洪达,贺子谦,等.考虑灵活性资源互济的虚拟电厂集群优化调度策略[J].东北电力大学学报,2024,44(5):101-111.

[8] 马雨彤,张春雁,窦真兰,等.共享型虚拟电厂风险调度与电能共享机制[J].电力系统自动化,2024,48(18):104-114.

[9] 陈嘉琛,陈中,李冰融,等.基于二阶随机动力学的多虚拟电厂自趋优能量管理策略[J].中国电机工程学报,2024,44(16):6294-6307.

[10] 许泽凯,刘嬰,和敬涵,等.新型配电网多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行方法[J].高电压技术,2024,50(1):105-116.

[11] 王印松,金涛,翁疆.改进转动惯量自适应控制的虚拟同步发电机[J].中国测试,2025,51(10):160-166.

[12] 戴观权,潘凯岩,蔡莹,等.基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术[J].可再生能源,2024,42(12):1681-1688.

[13] 于琪,黄蔚亮,刘晓婕,等.基于蚁狮优化算法的虚拟电厂优化调度技术研究[J].可再生能源,2024,42(6):836-844.

[14] 秦子恺,黄婧杰,周任军,等.计及源-荷不确定性的虚拟电厂多目标鲁棒优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(6):13-21.

[15] 李国,钱梦飞.基于 GMM 聚类的 AM-BiLSTM 机场安检旅客流量预测 [J]. 传感器与微系统,2024,43(9):11-14,18.

[16] 刘家丞,吴江,刘鹏远,等.面向负荷特征分析的地理分布式协同聚类方法 [J]. 电力系统自动化,2022,46(15):112-120.

The cooperative scheduling model for frequency and power balancing in heterogeneous virtual power plants based on target cascade analysis

Wang Tao[1], Li Jiangnan[2], Zhao Wenmeng[1], Ou Mingyu[2], Mao Tian[1], Jiang Jiru[2], Guo Ye[3]
(1.Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510530, China; 2.Shenzhen Power Supply Company, Shenzhen 518000, China; 3.Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Against the backdrop of global energy structure transformation and rapid development of renewable energy, how to achieve efficient aggregation and optimized scheduling of heterogeneous virtual power plants (VPPs) has become an important challenge. A heterogeneous VPPs frequency and power coordination scheduling model based on target cascade analysis method is proposed by improving the deep integration of clustering algorithm and control system. Introducing a learning mechanism to optimize the clustering process of photovoltaic battery energy storage systems (PVpBESSs) to meet the energy capacity requirements of a large number of power sources. A distributed control system for PVpBESSs was designed and validated on IEEE 13 node distributed photovoltaic power and energy storage systems. The experimental results show that compared with traditional scheduling methods, the scheduling efficiency has been improved by 18%. The model stabilizes the voltage deviation within 1% and maintains the frequency deviation at around 50 Hz; At the same time, the distribution of battery charging status is evenly maintained at 30%~90%, and efficient collaborative scheduling of photovoltaic and energy storage resources is achieved. Compared to methods that do not use learning mechanisms, the proposed model has strong practicality and potential for expansion, providing a new path for the practical application of virtual power plants.

Keywords: virtual power plant; clustering algorithm; frequency recovery; battery charging state