第 52 卷 第 6 期：2631-2643 高电压技术 Vol.52, No.6: 2631-2643
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250979

面向调度性能与经济收益的灵活资源聚合调控方法

刘科研[1]，贾东梨[1]，李 昭[1]，王 帅[1]，张 鑫[2]，胡斯佳[2]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；2. 湖南大学电气与信息工程学院，长沙 410082）

摘 要：为适应分布式源荷的大规模接入和电力市场化改革这一发展趋势，配电网的灵活性源荷以集群形式参与调控已逐渐成为行业共识。该文基于“集中-分布式”调控架构，并依托集群划分、外特性计算、指令分解与解聚合这一调控流程，构建了一套同时考虑配电网调度性能与聚合商收益的灵活性资源集群划分指标体系和实施策略。首先，构建了集群划分的综合评价指标体系。然后，考虑配电网有功、无功-电压耦合特性设计了一种样本生成和筛选机制，与此同时，在“外特性计算”过程中提出了一种灵活性资源出力范围降维模型简化方法，在“解聚合”过程中引入了可调对象的经济收益目标函数，采用模糊化方法将该目标与调度误差最小转化为单目标函数。仿真结果表明，所提方法获得的优秀集群划分方案不仅指令跟踪性能比肩独立调控，且与后者相比，经济收益提高了6.4%，有功网损和电压偏差率则分别降低了 1.2%和 0.6%。同时，所提模型简化方法在仅牺牲 2%跟踪精度的前提下，使得整个集群划分流程的平均运算耗时降低了 12%。

关键词：调度性能；聚合商收益；指标体系；集群划分；集群调控

Flexible Resource Aggregation Regulation Method Considering Dispatching Performance and Economic Benefits

LIU Keyan[1], JIA Dongli[1], LI Zhao[1], WANG Shuai[1], ZHANG Xin[2], HU Sijia[2]
(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract：In order to adapt to the development trend of large-scale access of distributed resources and loads as well as power market reform, it has gradually become the industry consensus that the flexible source and load of the distribution network participate in the regulation in the form of clusters. Relying on the “centralized-distributed” regulation architecture including “cluster partition, external feature calculation, instruction decomposition, and disaggregation”, we constructed a flexible re-source partitioning index system and implementation strategy after considering both the scheduling performance of the distribution network and the profit of the aggregator. Firstly, we designed a comprehensive evaluation index system to measure the performance of different cluster division methods participating in power grid dispatching and the income level of aggregation subjects. Then, aiming at the sample shortage of cluster division method that might be encountered in the actual execution process, we designed a sample generation and screening mechanism after considering the active and reactive power-voltage coupling characteristics of the distribution network. At the same time, in the process of “external feature calculation”, we proposed a dimension reduction model simplification method of flexible resource output range, which effectively reduced the difficulty of solving external feature of clusters. In the process of “disaggregation”, we introduced the economic profit objective function of adjustable objects, and the fuzzy method was used to transform this objective and the minimum scheduling error into a single objective function, which took into account the scheduling performance and the economic profit of adjustable resources in the cluster partition process. The simulation analysis results show that the excellent cluster partitioning scheme obtained by the proposed method not only has the instruction tracking performance comparable to independent control, but also increases the economic benefit by 6.4%,and the active network loss and voltage deviation rate are reduced by 1.2% and 0.6%, respectively.

Key words：dispatching performance; aggregator revenue; index system; cluster partition; cluster regulation

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5100-202255492A-2-0-CB)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC(5100-202255492A-2-0-CB).

0 引言

在全球化能源转型背景下，德[1]、美[2]、澳[3]、中[4]等国都在积极探索配电网中灵活性资源的管控模式，以实现更高效的能源管理和利用[5-6]。相关项目的研究与试点应用表明，灵活性资源以集群形式参与电网调度，是提升电力系统智能化水平和能源管理效率的重要手段，并已逐渐成为行业共识[7]。可调资源以不同的方式进行聚合，将对综合调度性能产生明显影响。文献[8]通过考虑多影响因素与双层一致性调频策略，构建了一种基于双马尔科夫链的资源聚合模型。文献[9]引入了内部能源成本、外部购电成本以及集群预期收益等经济指标，构建了聚合商参与电力市场调度的最优决策机制。文献[10]将信用度、经济性及供电能力等指标与可调资源的容量进行挂钩，提出以容量作为基本关注指标来实现聚合体收益最大的评价方法。然而，上述研究所关注的重心更多落在聚合商的利益上，对于除要求的基本调度目标以外的综合调度性能关注仍然不足。

在虚拟电厂(virtual power plant, VPP)与分布式资源(distribution resource, DR)的聚合方面，文献[11]在考虑各节点无功可调容量后构建综合电气距离模块度指标，实现配电网资源的聚合。文献[12]在此基础上采用了 Fast Unfolding 聚类算法进行聚合。文献[13]更进一步丰富了文献[11]的指标体系，并采用改进灰狼算法实现了聚合的寻优。文献[14]的 VPP 由储能和风电组成，利用储能的快速频率储备弥补风电波动性大的劣势，提高了电力系统的频率稳定。然而，上述聚合方法大多仅考虑了无功-电压耦合特性下节点间的电气联系或资源间的互补特性，事实上，中、低压配电网线路电抗、电阻接近[15]，目前鲜有研究在考虑相关资源特性的同时还研究了其有功、无功出力对聚合指标构建与聚合形态的影响。

为更好地实现对各聚合体的调控，一般需确定其出力边界，文献[16-17]基于几何投影定义了虚拟电厂调节能力曲线(virtual power plant capacity curve, VPP-CC)的概念，用于描述 VPP 所能提供的有功、无功功率允许范围。文献[18]提出了一种聚合等值算法和凸胞边缘检测法用于刻画分布式储能资源的可行域。文献[19-20]将分布式新能源的出力不确定性与基于闵可夫斯基和的可行域近似求解法相结合，提出了 VPP 调度边界概率分布刻画方法。文献[21]则通过顶点枚举法求解考虑灵活资源出力不确定性的 VPP 可行域。上述方法虽能较准确地评估 VPP 的出力范围，但计算一般较为复杂。如何简单且较为准确地获得不同划分样本下各聚合体的出力边界以评估配电网在各种集群划分方式下的调度性能，仍值得探讨。

此外，如何提高配网各可调资源参与调度/需求侧响应的积极性，也受到业内的广泛关注[22]。文献[23]提出了一种考虑用户需求响应不确定性的分布鲁棒优化方法，构建了包含 VPP 经济性和用户舒适性的多目标优化模型。文献[24]提出了一种聚合指令分解方案与等效成本计算方法，能够有效响应调度指令并提升 VPP 收益。文献[25]则提出了一种电力紧平衡场景下的灵活资源协同调控策略。文献[26]通过建立灵活性资源运行模型和定价方法来实现对资源的有效聚合，并采用经济最优的调度方式提高集群内各灵活资源参与调度的积极性。上述研究虽从不同侧面建立了可调资源的调度模型，但在对可调资源进行集群划分的过程中，如何高效准确地确定不同集群划分方案下各聚合资源的出力边界，以评估配电网在多种聚合模式下的调度性能，仍值得进一步探讨。

鉴于此，构建了一套同时考虑配电网调度性能与聚合商收益的灵活性资源集群划分指标体系和实施策略。主要贡献如下：(1)设计了一套用于衡量不同集群划分方式参与电网调度表现和聚合主体收益水平的集群划分评价指标体系；(2)将配电网有功、无功-电压耦合特性纳入考虑，提出了一种集群样本生成和筛选机制；(3)在整个集群划分流程的“外特性计算”环节中提出了一种灵活性资源出力范围模型简化方法；(4)在“解聚合”环节中引入可调对象的经济收益和调度误差，并采用模糊化方法将其转化为单目标模型。因所提集群划分方法同时考虑了电网调度性能和聚合主体的利益，有利于电网运营部门在考虑综合调度性能的前提下，对聚合商以自身盈利为首要目标的“无序”聚合行为进行适当约束，促进市场环境下电网安全、高效运营与市场主体利益诉求的均衡。

1 集群划分评价指标

1.1 集群划分评价指标

针对调度中常用的自动发电控制(automatic generation control, AGC)和自动电压控制(automatic voltage control, AVC)，构建了 6 个指标对调度性能

和聚合商收益进行综合评价。

1.1.1　灵活性资源接受调控的售电收益

售电收益是聚合商和其所辖资源关注的重点(假设聚合商与可调资源按一定比例分享售电收益)，它直接反映了各灵活资源参与电网调控的经济效益，通过合理组织不同禀赋的资源并优化集群内可调资源的协同调度，能够显著提升其售电收益，从而增强各可调资源的聚合意愿。因此，售电收益作为关键的经济性指标，对评估资源参与聚合调控策略的有效性具有重要意义。不同集群划分方式下各新能源发电主体在接受 AGC、AVC 调度时的售电收益分别为ω_1和ω_2，其计算式分别为：

$$\omega_1=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in B}\left(\begin{array}{l}\sum\limits_{l\in\tau^{\text{renew}}(i)}(1-\partial_l)p_{l,t}^{\text{AGC}}+\\ \sum\limits_{m\in\tau^{\text{ess}}(i)}(1-\partial_m)\varepsilon_{m,t}^{\text{dis}}e_{m,t}^{\text{AGC}}\end{array}\right)p_t^{\text{DER}} \tag{1}$$

$$\omega_2=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in B}\left(\begin{array}{l}\sum\limits_{l\in\tau^{\text{renew}}(i)}(1-\partial_l)p_{l,t}^{\text{AVC}}+\\ \sum\limits_{m\in\tau^{\text{ess}}(i)}(1-\partial_m)\varepsilon_{m,t}^{\text{dis}}e_{m,t}^{\text{AVC}}\end{array}\right)p_t^{\text{DER}} \tag{2}$$

式中：T为1个时间调度周期；$p_{l,t}^{\text{AGC}}$和$p_{l,t}^{\text{AVC}}$分别表示新能源发电单元l在t时刻接受AGC和AVC调度指令时的有功出力，kW；$\varepsilon_{m,t}^{\text{dis}}$的取值为0或1，当其取值为1时表示储能$m$在$t$时刻处于放电状态；$e_{m,t}^{\text{AGC}}$和$e_{m,t}^{\text{AVC}}$分别表示储能$m$在$t$时刻的有功出力，kW；$\tau^{\text{renew}}(i)$为节点$i$中新能源发电单元的集合；$\tau^{\text{ess}}(i)$为节点$i$中储能单元的集合；$\partial_l$和$\partial_m$分别表示新能源和储能设备的运维折算因子；$B$表示所有节点的集合。

根据式(1)、(2)可知，指标ω_1和ω_2分别表示各可调资源在时间周期T内接受AGC和AVC调控时的售电收益总和。

1.1.2　含灵活性资源调控的网络有功损耗

对于同一可调资源，若处在不同的集群中，则其出力可能显著不同，进而影响到全网的潮流分布和网损。而网络有功损耗作为电网运行性能的重要指标，受到电网调度部门的重点关注，为定量评价这一特征，提出有功损耗指标ω_3和ω_4，其计算式分别为：

$$\omega_3=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{i\in B}\sum_{l\in\tau(i)}p_{l,t}^{\text{AGC}}+p_{\text{grid-in},t}-\sum_{i\in B}p_{i,t}^{\text{D}}\right) \tag{3}$$

$$\omega_4=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{i\in B}\sum_{l\in\tau(i)}p_{l,t}^{\text{AVC}}+p_{\text{grid-in},t}-\sum_{i\in B}p_{i,t}^{\text{D}}\right) \tag{4}$$

式中：$p_{\text{grid-in},t}$表示外部电网在t时刻注入该配电网的有功功率，kW；$p_{i,t}^{\text{D}}$表示节点i上的负荷在t时刻消耗的有功功率，kW；$\tau(i)$表示节点i中灵活性资源的集合。

根据式(3)和式(4)可知，配网的总有功功率由小括号内第1、2项所构成，除去第3项负荷消耗的有功后即可得到网络的总有功损耗。

1.1.3　含灵活性资源调控的电压偏移率

电压偏移率是电力系统优质运行的重要指标，对其进行有效控制不仅能确保设备的安全运行，还能优化电网效率，增强系统对复杂运行环境和多样化资源的适应性。因此，引入电压偏移率ω_5和ω_6来衡量可调资源在参与 AGC、AVC 调度过程中配网各个节点电压与标称电压的整体偏离程度，其计算式分别为：

$$\omega_5=\frac{1}{T}\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in B}\left|1-\frac{U_{i,t}^{\text{AGC}}}{U_{\text{B}}}\right|\right)\times100\% \tag{5}$$

$$\omega_6=\frac{1}{T}\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in B}\left|1-\frac{U_{i,t}^{\text{AVC}}}{U_{\text{B}}}\right|\right)\times100\% \tag{6}$$

式中：$U_{i,t}^{\text{AGC}}$和$U_{i,t}^{\text{AVC}}$分别表示节点i在t时刻接受AGC和AVC调控时的电压，kV；U_{B}为电压基准值，一般为与外部电网相连节点的额定电压。

根据式(5)、(6)可知，ω_5和ω_6分别表示各节点在T时间内接受AGC和AVC调控时的电压与基值电压的偏差绝对值之和的平均值。

1.2　指标赋权

当集群样本生成后(见后文2.2节)，针对上述指标，采用层次分析和熵权法生成组合权重对集群划分的样本进行评估，并从中遴选出优秀样本。

层次分析法基于决策者对自身经验和知识的认知映射构建各指标的权重解析体系，并通过各指标间的重要程度信息得到主观权重。基于上述思想，定义指标i的主观权重ϕ_i^{A}为：

$$\phi_i^{\text{A}}=\sum_{j\in I}A_{i,j}\Big/\sum_{i\in I}\sum_{j\in I}A_{i,j} \tag{7}$$

式中：i和j分别表示不同的指标序号；I表示全体指标的集合；$A_{i,j}$表示矩阵$\boldsymbol{A}$第i行第j列元素，$A_{i,j}$的取值共有3个标度，分别是1、0.5、0，含义分别为指标i更重要、指标i和指标j同等重要、指标j更重要。

作为一种客观赋权方法，熵权法通过计算信息熵来量化不同指标所提供的信息量，并以此来描述

各指标间信息量的差异。基于该思想，定义指标 i 的客观权重 ϕ_i^{E} 为：

$$\phi_i^{\mathrm{E}}=\frac{1-E_i}{J-\sum_{j\in I}E_j},i\in I \tag{8}$$

式中：J 为参与指标的总数；E_i 表示指标 i 所提供的信息熵，该指标可以量化不同指标的数据差异性，通过指标数据的内在波动性客观反映该指标对系统性能的影响强度，其计算式为：

$$E_i=\sum_{n=1}^{N}\left(\zeta_{n,i}\ln(\zeta_{n,i})\right)\Big/\ln(N),\ i\in I \tag{9}$$

式中：N 为参与评价的样本总数；$\zeta_{n,i}$ 为样本 n 中第 i 项指标的评价等级概率，其表达式为：

$$\zeta_{n,i}=R_{n,i}\Big/\left(\sum_{n=1}^{N}R_{n,i}\right) \tag{10}$$

式中：$R_{n,i}$ 为样本 n 中指标 i 的评价等级，其取值分别为 1、0.75、0.5、0.25，对应着优秀、良好、普通和较差这 4 个等级。

将主、客观权重相乘并归一化，可得到指标 i 的组合权重 ϕ_i 为：

$$\phi_i=\frac{\phi_i^{\mathrm{A}}\phi_i^{\mathrm{E}}}{\sum_{i\in I}\phi_i^{\mathrm{A}}\phi_i^{\mathrm{E}}} \tag{11}$$

2 集群划分实施策略

2.1 灵活性资源以集群形式参与调控的结构

灵活资源以集群形式参与调控的策略主要涉及如下 4 个主要步骤：集群划分、资源外特性计算、调控指令的分解以及解聚合，其总体架构见图 1。

2.2 集群划分样本的提取

在正式进行集群划分之前，需获得有效且具有代表性的集群划分样本，本文认为样本应首先满足如下约束：①每个集群内可调资源的数量应在 2 个以上；②集群内部各节点在拓扑上应该互相连接，不允许孤岛的存在；③集群划分样本应有完备性——每个可调资源必须属于一个集群；④集群划分样本应有唯一性——每次生成的划分结果应与之前已记录的样本互不相同；⑤所有集群的平均电气距离需小于预设阈值。

基于上述约束，图 2 为提出的集群划分样本生成流程。在此过程中有一点需要相当注意：对于中低压配电网，线路的电抗、电阻较为接近[15]。因此，各节点有功、无功的变化都会对系统的电压分布产生明显影响，故提出一种综合考虑有功、无功的电压灵敏度矩阵来描述参与调控的集群内部各节点间电气联系，表达式如下：

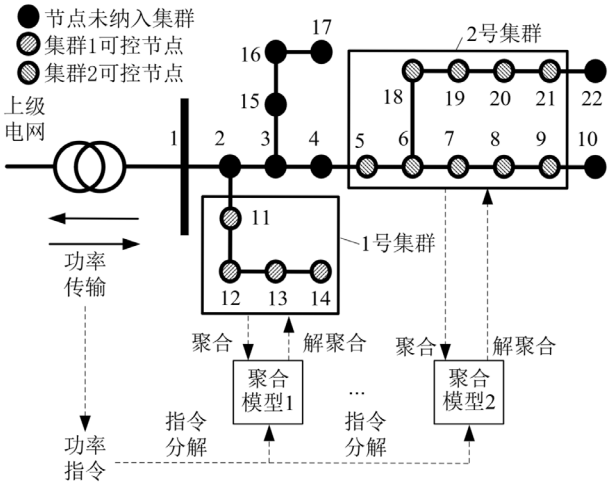


图 1 分布式资源以集群形式参与调控的架构

Fig.1 Regulating framework of DR in clusters

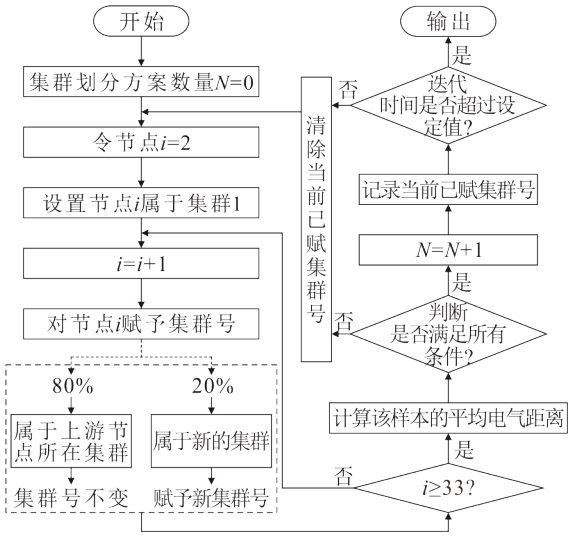


图 2 集群划分样本的生成方法

Fig.2 Cluster partition sample generation method

$$E_{\mathrm{D}}=\underset{m\in\varphi(n)}{\mathrm{mean}}\left(\underset{i,j\in\gamma(m)}{\mathrm{mean}}\left(d_{ij}\right)\right) \tag{12}$$

式中：$\varphi(n)$为所有节点的集合；$\gamma(m)$为集群 m 的节点集合；d_{ij} 表示集群内部各节点间的电气距离，即：

$$d_{ij}=\lg\left(\frac{S_{ii}^{\mathrm{VQ}}}{S_{ij}^{\mathrm{VQ}}}\right)+\lg\left(\frac{S_{ii}^{\mathrm{VP}}}{S_{ij}^{\mathrm{VP}}}\right) \tag{13}$$

式中：S_{ii}^{VQ} 和 S_{ii}^{VP} 分别表示电压-无功和电压-有功灵敏度矩阵的第 i 行第 j 列。

节点 i、j 间的电气距离衡量了它们在电气上联系的紧密程度。为综合考量聚合商与电网的利益，需确保集群内各节点的平均电气距离在合理范围

内，因此有：

$$E_{\mathrm{D}} \le \lambda_{\max} \tag{14}$$

式中：$\lambda_{\max}$为E_{D}的上限值。

2.3　集群外特性计算

对于组成集群的灵活性可调资源，其有功出力具有不同的特性，它们的无功可调范围也会受到实际有功出力与其装机容量的约束，其功率因数也应在一定范围内变化，则灵活性资源的出力边界可用式(15)进行约束，其调控模型见图 3 左侧阴影区域。

$$\begin{cases} p_l^{\min} \le p_l \le p_l^{\max} \\ q_l^{\min} \le q_l \le q_l^{\max} \\ p_l^2 + q_l^2 \le \delta_{l,N}^2 \\ \cos\theta_l \le N^{\max} \end{cases} \tag{15}$$

式中：p_l、q_l和$\delta_{l,N}$分别为可调资源 l 的有功功率输出、无功功率输出与额定装机容量(kW、kvar、kW)；$p_l^{\max}$、$p_l^{\min}$和$q_l^{\max}$、$q_l^{\min}$分别表示可调资源 l 的有功和无功功率输出的上限和下限(kW、kvar)；θ_l表示可调资源 l 的功率因数相角；$N^{\max}$为可调资源 l 的最大功率因数。

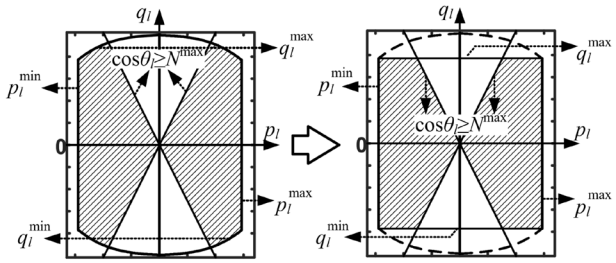


图 3　灵活性资源降维模型

Fig.3　Dimensionality reduction model of flexible resource

为降低后续集群外特性的求解难度，在式(15)的基础上，采用式(16)对各灵活性资源的出力约束模型进行简化。

$$\begin{cases} q_l^{\max} = \sqrt{\delta_{l,N}^2 - \left(p_l^{\max}\right)^2} \\ q_l^{\min} = -\sqrt{\delta_{l,N}^2 - \left(p_l^{\min}\right)^2} \end{cases} \tag{16}$$

简化后各灵活可调资源的出力范围如图 3 右侧阴影所示。

基于式(15)、(16)和图 3，最后可将整个集群的外特性表示为：

$$\begin{cases} P_o^{\min} \le P_o \le P_o^{\max} \\ Q_o^{\min} \le Q_o \le Q_o^{\max} \end{cases} \tag{17}$$

式中：o 为集群号；P_o和Q_o分别为集群 o 的有功、无功出力(kW、kvar)，其上、下限分别为$P_o^{\max}$、$P_o^{\min}$和$Q_o^{\max}$、$Q_o^{\min}$。

具体操作时，先将集群外的所有资源全部“关机”(出力为 0)，集群内部可调资源模型按图 3 右侧所示边界形态进行设置，以集群与外部相连节点的功率最大或者最小作为目标函数，运算最优潮流，即可得到整个集群的外特性边界$P_o^{\max}$、$P_o^{\min}$和$Q_o^{\max}$、$Q_o^{\min}$。该方法可以有效简化集群内部复杂资源的管理，使得集群能够作为一个整体快速参与到电网的优化调控中，进而在集群划分过程中快速确定优秀样本。

2.4　指令分解与解聚合计算

2.4.1　集群间指令分解

集群间指令分配的核心在于依据各可控集群的功率外特性，实现对总体调控指令的精细化分配。该文通过各集群功率出力边界的比例为每个集群分配功率指令，具体为：

$$\begin{cases} P_o^* = p^* \dfrac{P_o^{\max} - P_o^{\min}}{\sum_{o=1}^{O}\left(P_o^{\max} - P_o^{\min}\right)} + P_o^{\min} \\ Q_o^* = q^* \dfrac{Q_o^{\max} - Q_o^{\min}}{\sum_{o=1}^{O}\left(Q_o^{\max} - Q_o^{\min}\right)} + Q_o^{\min} \end{cases} \tag{18}$$

式中：P_o^*和Q_o^*分别表示集群 o 接受到的有功、无功功率指令(kW、kvar)；O 表示集群的数量；p^*和q^*分别表示上级电网对配网公共连接点(point of common coupling, PCC)点发送的有功、无功指令(kW、kvar)。

该方法不仅优化了指令分配的效率，而且确保了集群间的相对协调，有利于提高电网调控的整体性能和响应速度。

2.4.2　集群内解聚合模型

为兼顾聚合单元技术、经济性能的平衡，设计了指令跟踪误差最小与聚合商/聚合主体收益最高为目标的解聚合模型。

为确保聚合体有较好的指令跟踪能力，设定解聚合的第 1 个目标函数为：

$$\min F_1 = \min\left(\alpha\left|P_{\mathrm{first}} - P_m^*\right| + \beta\left|Q_{\mathrm{first}} - Q_m^*\right|\right) \tag{19}$$

式中：α、β 分别表示集群的有功、无功跟踪指令误差的权重；P_{first}和Q_{first}分别表示集群与外部相连节点对应的有功、无功功率(kW、kvar)；P_m^*和Q_m^*约束条件与可调资源独立参与调控的模型相同(见附录 A)。

为保证聚合商/聚合主体有较好的收益(该文假设聚合商和可调资源按一定比例共享售电收益)，定义第 2 个目标函数为：

$$\max F_2=\max\left(\sum_{t=1}^{T}(P_t^{\mathrm{DER}}+\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}P_{\mathrm{ESS}})p_t^{\mathrm{DER}}\Delta t\right) \tag{20}$$

实现该目标需满足的约束如下文所述。

储能充放电状态约束：

$$\varepsilon_t^{\mathrm{c}}+\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}\le 1 \tag{21}$$

电荷状态约束：

$$Q_t=Q_{t-1}+\varepsilon_t^{\mathrm{c}}P_{\mathrm{ESS}}\eta_{\mathrm{c}}\Delta t+\Delta t\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}P_{\mathrm{ESS}}/\eta_{\mathrm{dis}} \tag{22}$$

储能容量约束：

$$S_{\mathrm{SOCmin}}Q_{\min}\le Q_t\le S_{\mathrm{SOCmax}}Q_{\max} \tag{23}$$

分布式发电资源消纳约束：

$$P_t^{\mathrm{DER}}+(\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}-\varepsilon_t^{\mathrm{c}})P_{\mathrm{ESS}}\le P_t^{\mathrm{DER.pre}} \tag{24}$$

式中：P_t^{DER}、$P_t^{\mathrm{DER.pre}}$ 分别为分布式发电资源的实际有功出力与预测有功出力，kW；p_t^{DER} 为 t 时刻发电资源售电电价，元；Δt 表示一个时间段，h；$\varepsilon_t^{\mathrm{c}}$、$\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}$ 分别为储能的充、放电状态；η_{c}、η_{dis} 分别为储能的充、放电效率；P_{ESS} 为储能的充/放电功率，kW；$Q_{\max}$、$Q_{\min}$ 分别表示储能存储容量的最大、最小值，kWh；Q_t 为储能在 t 时刻的容量，kWh；S_{SOCmax}、S_{SOCmin} 分别为储能的最大、最小荷电状态。此外，日内调控中影响储能系统使用寿命的约束见附录 C。

为同时考虑集群的功率跟踪指令误差和集群资源收益这 2 个目标，降低这 2 个目标函数在求解过程中的计算复杂度，对 F_1 和 F_2 进行模糊化处理，使其转化为一个统一的目标函数。首先确定 F_1 和 F_2 的隶属度函数 $\mu(F_1)$和 $\mu(F_2)$为：

$$\begin{cases}\mu(F_1)=(F_{1,\min}+\gamma_1F_{1,\min}-F_1)/\left(\gamma_1F_{1,\min}\right)\\ \mu(F_2)=(F_2-F_{2,\max}+\gamma_2F_{2,\max})/\left(\gamma_2F_{2,\max}\right)\end{cases} \tag{25}$$

式中：$F_{1,\min}$ 和 $F_{2,\max}$ 分别表征集群的功率跟踪指令误差最小和集群内部资源收益最高；γ_1 表征调度部门对跟踪误差的容忍度权重(调度导向)；γ_2 反映聚合体对经济收益的诉求权重(经济导向)；为了体现“调度-经济”并重的原则，此处取 γ_1=γ_2=0.5。

实际上，在式(25)中，$\gamma_1F_{1,\min}$ 和 $\gamma_2F_{2,\max}$ 分别表示误差和收益的调节范围，为防止 $F_{1,\min}$ 过小而导致调节区间过窄的问题，本文将其取为各可调资源以独立形式参与调度时的平均功率跟踪误差，$F_{2,\max}$ 的设置思路与此类似；$\mu(F_1)$和 $\mu(F_2)$表示指令跟踪误差和集群收益综合指标。以第 1 个式子为例，当 F_1<$F_{1,\min}$ 时，意味着指令跟踪误差降低到一个理想的范围，故 $\mu(F_1)$取 1，当 F_1>$F_{1,\min}$+$\gamma_1F_{1,\min}$ 时，意味着指令跟踪误差大于设定的范围，因此 $\mu(F_1)$取 0。

结合上述操作，可将 $\min F_1$ 和 $\max F_2$ 转化为：

$$\max F=\gamma_3\mu(F_1)+\gamma_4\mu(F_2) \tag{26}$$

式中：F 表示优化后系统的综合指标；γ_3 和 γ_4 分别表示 2 个优化目标的权重系数，且 γ_3+γ_4=1。

2.5 集群划分评价方法构建流程

基于前文所述评价流程，将灵活性资源以集群形式参与调度的评价流程绘制在图 4 中，现对其进行阐述(以 IEEE-33 节点为例)：

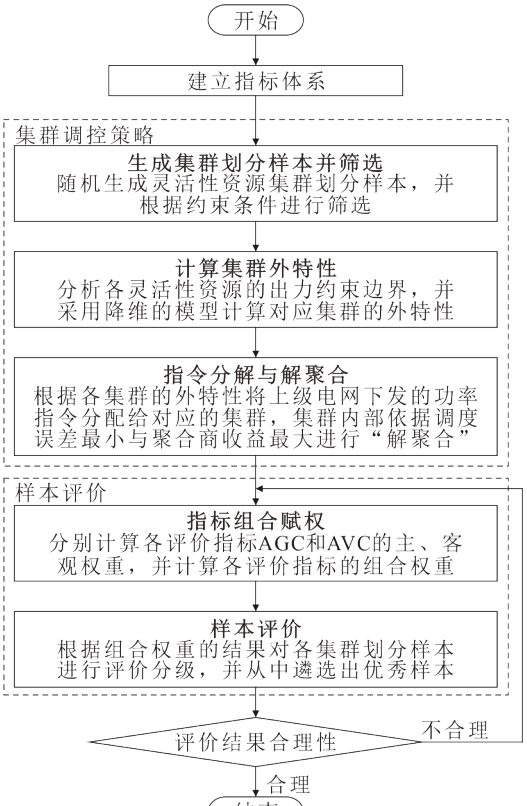


图 4 评价流程

Fig.4 Evaluation process

1）构建集群划分评价指标体系(见第 1 章)。

2）生成满足基本约束的集群样本(见第 2.2 节)。

3）对集群外特性进行简化计算(见第 2.3 节)。

4）根据不同集群的外特性对其进行指令分解，并在集群内部“解聚合”(见第 2.4 节)。

5）指标组合赋权与评价。

首先，采用层次分析法计算得到各指标对应的主观权重。然后，通过熵权法计算各指标的客观权重。最后，将主观权重与客观权重进行乘型组合，得到组合权重，以此对各样本进行综合评价，并根据评价结果筛选得到优秀样本。

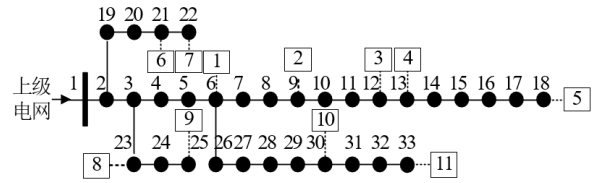
6）合理性检验。

分析评价结果是否合理，这一步依托多个随机的调度指令(该调度指令需确保在整个配网的功率可调范围之内)来对评价流程筛选出的优秀样本进行误差检验，若遴选出的优秀样本平均调度误差不在合理范围内，则说明前文主观权重的赋值存在问题，故需要进行重新赋值与遴选优秀样本。

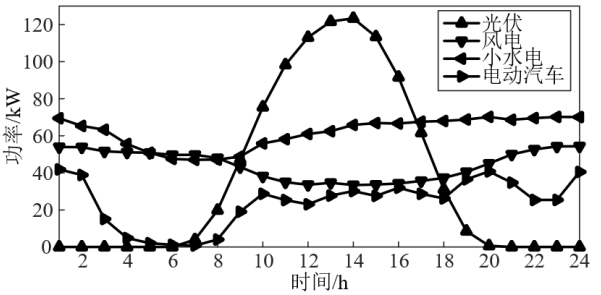
3　算例分析

3.1　算例概况

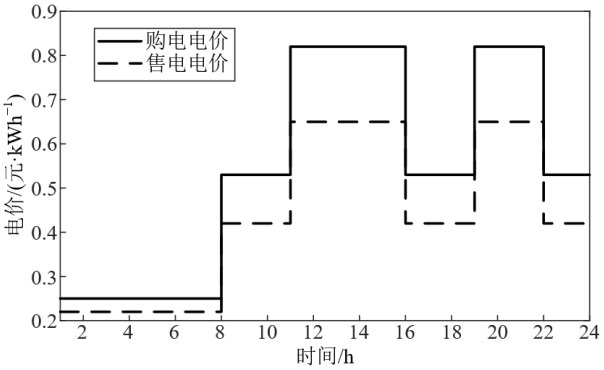
为验证所提集群划分样本生成方法的有效性以及在该指标体系下筛选得到的集群划分样本在参与电网调度时的正确性。在 IEEE-33 节点系统部署了 11 个灵活性资源(拓扑结构详见图 5(a)，参数配置见表 1)。



(a) 算例拓扑



(b) 算例中各灵活性资源功率特性曲线



(c) 现货市场24 h购售电价格

图 5　算例拓扑与配置

Fig.5　Example topology and configuration

各类灵活性资源(与表 1 中的单个资源对应)的功率变化曲线如图 5(b)所示(图中的曲线数据均基于实际测量结果，并按配电网的电压等级和各资源的安装容量(表 1)进行了等比例缩放，数据来源及其说明见附录 B)，灵活性资源的最大调节能力约为全网总负荷的 20%；另外，仔细观察图 5(b)还可发现，电动汽车负荷的高峰期主要集中在 12~14 h 与 18~20 h 这 2 个时段，这 2 个时段一般为下班高峰期，因此其负荷较高(图 5(b)中右三角所在曲线为电动汽车的有功耗能曲线)。设定现货市场 24 h 的购售电价格如图 5(c)所示。

表 1　算例网络资源配置表

Table 1　Resource allocation of the example network

可调资源标号	可调资源所在节点号	各灵活性资源属性	容量/kVA
1	6	储能	100
2	9	分布式光伏资源 1	150
3	12	分布式风电资源 1	100
4	13	分布式光伏资源 2	150
5	18	微型水电资源	100
6	21	分布式光伏资源 3	150
7	22	分布式光伏资源 4	150
8	23	分布式风电资源 2	100
9	25	电动汽车充电桩柔性负载 1	100
10	30	电动汽车充电桩柔性负载 2	100
11	33	分布式风电资源 3	100

注：储能系统的容量为 1 MWh，初始荷电状态为 0.5。

3.2　灵活性资源独立参与调控

为与后文第 3.3 节中提到的以集群方式参与电网调度的功率指令跟踪等其他性能进行对比，本节将展示配电网中的灵活性资源独立参与调度时，PCC 点的功率输出特性及其跟踪效果(具体实施操作见附录 A)。

首先，设定 2 个目标：一是使 PCC 点(图 5(a)中 1 号节点)注入的功率达到最大，二是使其注入功率达到最小对全网进行最优潮流计算(通用约束条件见附录 A)。此过程中，PCC 点与外部系统的交互功率是关注的重点，结果见图 6。由图 6 可知，正午时段自 PCC 点流入的有功功率发生了显著变化，这主要归因于正午时段光伏系统的出力增加。值得注意的是，在 AGC 功率外特性下，由于这类分布发电资源不具备吸收有功的能力，因此其功率外特性上限为一条直线(即所有分布式灵活资源均处于关机状态)，而在 AVC 功率外特性中，由于分布式发电资源会吸收无功，因此其在正午时段会出现无功需求增加的情形。

可调资源以独立形式参与 AGC、AVC 调度，自 PCC 点流入的功率曲线如图 7 所示。鉴于功率指令需依据实时状况进行动态调控，故设定在 10~14 h

时段内 AGC 下发的有功指令降低，同时为了模拟指令超出 PCC 点功率外特性的情况，在 17~21 h 时段之间 AGC 下发一个略低于功率可调外特性下限的指令。结果表明，当指令未超出功率可调外特性范围时，PCC 点可获得较好的功率指令跟踪效果；而在超过功率可调外特性的时间段内，由于各分布式资源出力(以光伏为主)无法达到指令值，故会出现一定的偏差。而在对 AVC 指令进行跟踪时，设定 10~14 h 时段内无功指令增加(略微超出 PCC 点的无功外特性范围)，17~21 h 时段内无功指令减小(未超出 PCC 点的无功外特性范围)。可以看到，正午时由于有功指令的减小，会使得分布式电源的有功出力接近满发状态(如光伏)，此时其调节无功的能力较弱，因而当指令超出其可调范围时，会出现一定偏差；而在夜间，由于光伏不再发出有功，此时其无功调节容量增加，故而可以发出无功来跟踪 AVC 功率指令，使得总体跟踪效果较好。

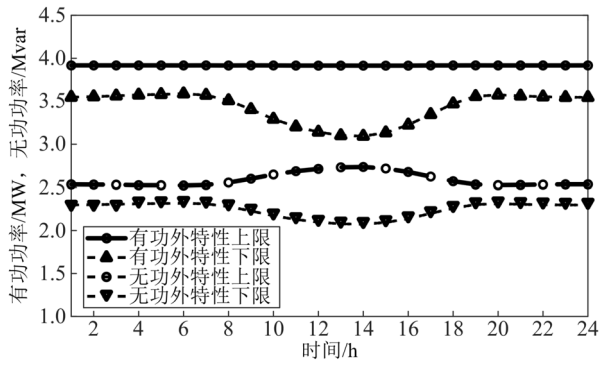


图 6 算例 PCC 点功率外特性

Fig.6 External power characteristics of PCC node

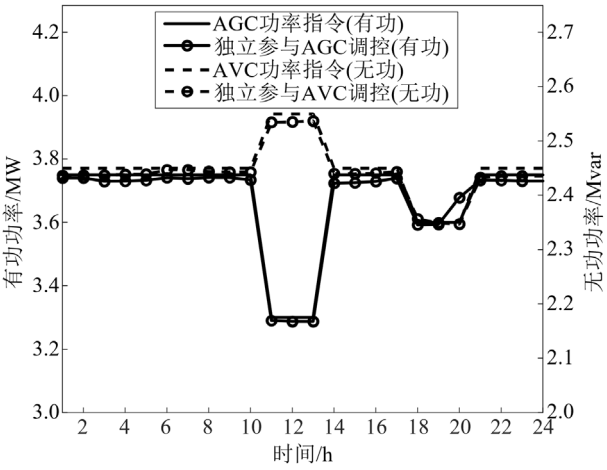


图 7 PCC 点功率跟踪曲线

Fig.7 PCC point power tracking curve

3.3 灵活性资源以集群形式参与调控

3.3.1 样本生成与筛选

图 8 展示了不同 E_D 上限(即 λ_{max})下集群划分方式的样本数。由图 8 可知，随着 λ_{max} 的减小，满足条件的集群划分方式样本数先缓慢减少(λ_{max} 在 0.4~0.5 之间，λ_{max}=0.5 时样本数为 755)，然后进入一个快速下降区间(λ_{max} 在 0.3~0.4 之间)，当 λ_{max} 在 0.2~0.27 之间时，样本数量虽然持续减小(λ_{max}=0.27 时，样本数仅为 48)，但总体变化不大。事实上，E_D 的上限值 λ_{max} 不宜过小或过大，否则将过度限制(或减弱)集群划分方式的样本筛选能力，导致符合条件的样本数量过少(或过多)，不利于全面评价集群样本的性能。为获得一批具有代表性的集群划分样本，根据图 8 最终设定 λ_{max}=0.35，根据这一设定，算例最终可获得 342 个有效集群划分样本。

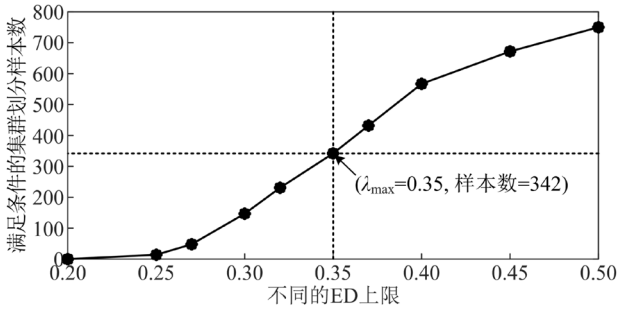


图 8 集群划分样本数与 λ_{max} 的关系

Fig.8 Relationship of cluster partition samples' number with λ_{max}

3.3.2 典型集群划分样本参与电网调度的性能分析

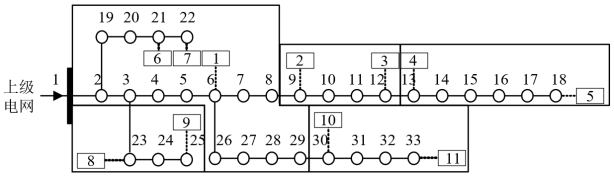
为进一步研究以不同集群划分方式参与电网调度的性能，参照表 2 的组合赋权结果，遴选了如图 9 所示的 3 个典型集群划分方案进行对比分析，集群划分方式 1(图 9(a))和集群划分方式 3(图 9(c))分别对应 AGC 和 AVC 组合赋权评价最高，集群划分方式 2(图 9(b))为 AGC 和 AVC 组合赋权评价居中的样本。

表 2 基于组合赋权得到的指标权重

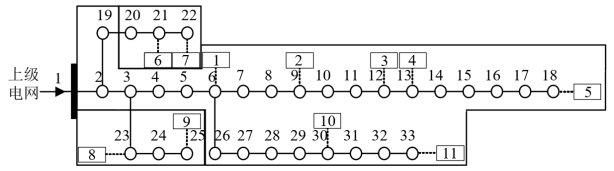
Table 2 Index weights based on combinatorial weights

指标	组合权重/%	
	AGC	AVC
ω_1	31.16	5.30
ω_2	0.29	60.49
ω_3	31.16	5.30
ω_4	12.46	13.24
ω_5	21.81	3.76
ω_6	3.12	11.92

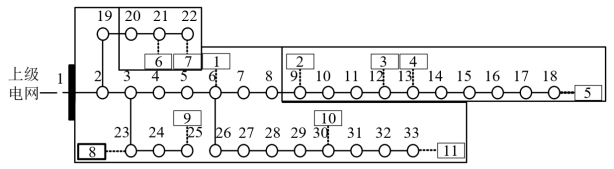
与此同时，对比表 3 第 2 列和第 3 列的数据可知，当采用第 2.3 节所提的外特性简化方法后，整个集群划分流程的平均运算耗时降低了约 12%，而平均跟踪误差仅下降了 2%。这验证了所提外特性简化方法在整个集群划分策略中的正确性及其对所生成的有效样本规模的适配性。



(a) 集群划分样本1(AGC组合赋权评价最高)



(b) 集群划分样本2(AGC/AVC组合赋权评价居中)



(c) 集群划分样本3(AVC组合赋权评价最高)

图 9　典型集群划分样本

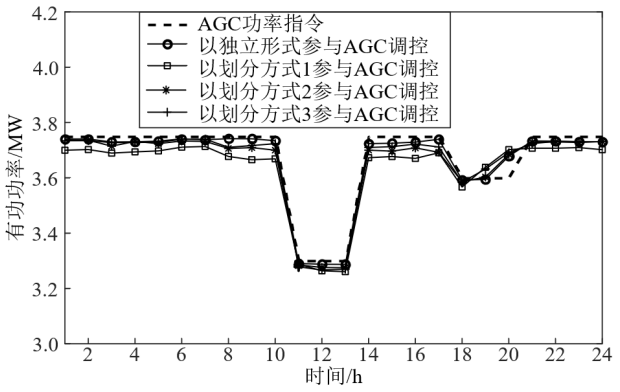
Fig.9　Typical cluster partition sample

表 3　各集群划分方式下 PCC 点功率指令跟踪精度及系统运算总耗时

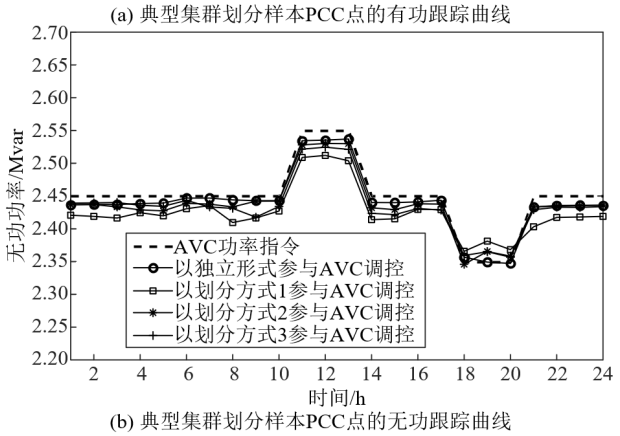
Table 3　PCC point power tracking precision of each cluster division mode and system calculating time

项目类型	外特性未简化前		外特性简化后	
	有功指令跟踪误差/%	无功指令跟踪误差/%	有功指令跟踪误差/%	无功指令跟踪误差/%
集群划分样本 1	3.775 0	2.067 6	3.859 4	1.954 7
集群划分样本 2	3.023 2	1.478 7	3.315 0	1.582 2
集群划分样本 3	2.776 4	1.797 2	2.790 9	2.000 7
独立参与调度	1.709 2	0.982 1	1.753 3	1.138 3
运算耗时/s	106.446 8		94.881 9	

图 10 展示了可调资源以图 9 所示集群划分方案和独立参与调度(见附录 A)时，在 24 h 内对 PCC 点 AGC、AVC 功率指令的跟踪曲线。从图 10 可以看出，尽管各种划分方式之间存在细微的差别，但所有划分方式均能有效地实现指令的跟踪，特别是在指令超出集群功率外特性边界的情况下，各划分方式均能够成功地跟踪到外特性的上(下)限。此外，虽然 3 种典型集群划分方式下 PCC 点的功率指令跟踪误差略大于可调资源以独立形式参与调控的情况，但总体跟踪精度还是控制在一个较为合理的范围：从表 3 第 4、5 列可以看出，其跟踪相对误差均小于 4%(相对误差=集群调度的误差/独立调度误差−1)。该结果有效验证了所提集群划分与调控策略在配电网多样化资源配置下对指令跟踪的正确性。



(a) 典型集群划分样本PCC点的有功跟踪曲线



(b) 典型集群划分样本PCC点的无功跟踪曲线

图 10　不同集群划分方案 PCC 点功率跟踪曲线

Fig.10　PCC point power tracking curves of different cluster division schemes

表 4 给出了 3 种典型集群划分样本 6 个指标的评价结果。前文已经说明，集群划分方式 1 的 AGC 综合评价性能最好，这从表 4 中 ω_1、ω_3 和 ω_5 的数值可以看出：ω_1 较大，代表集群划分方式 1 在接受 AGC 调控下的新能源售电收益最大；ω_3 和 ω_5 较小，则说明集群划分方式 1 在接受 AGC 调控时的网损

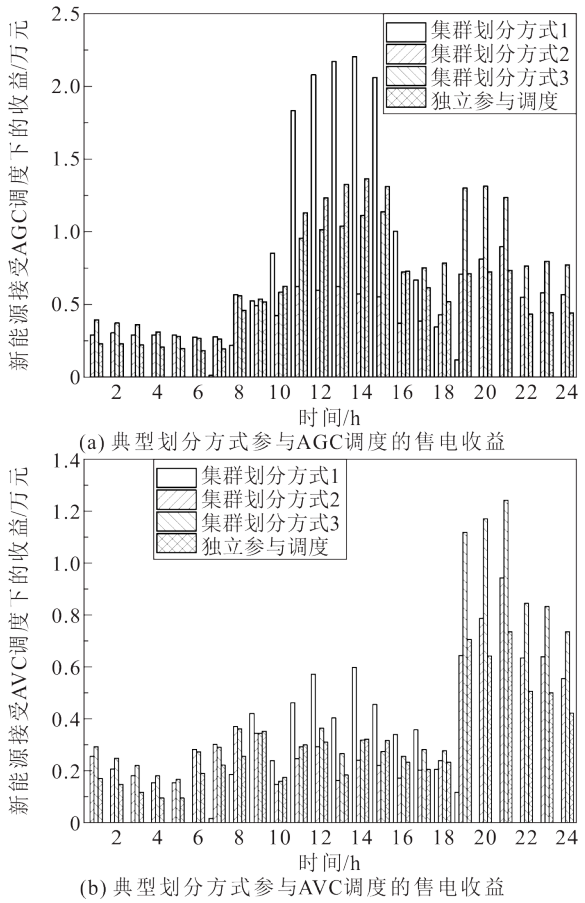
表 4　各集群划分方式的指标

Table 4　Indicators of each cluster division mode

指标	不同集群划分方式下的指标取值			
	集群划分方式 1	集群划分方式 2	集群划分方式 3	独立调度
ω_1	2.646 3	2.518 7	2.463 5	2.489 2
ω_2	3.617 2	3.615 3	3.635 2	3.622 3
ω_3	0.177 6	0.179 0	0.179 7	0.179 4
ω_4	0.175 6	0.176 2	0.176 0	0.177 7
ω_5	0.047 6	0.047 8	0.048 0	0.047 9
ω_6	0.047 2	0.047 4	0.047 3	0.047 3

和电压偏移最小；但集群划分方式 1 在功率指令跟踪上略逊于集群划分方式 2 和 3(见表 3)。

此外，仔细观察图 11(a)可知，集群划分方式 1 在参加 AGC 服务时，售电收益在 10~15 h 时段表现较为抢眼，而另外 2 种集群划分方式则在 19~21 h 时段收益较高(但低于集群划分方式 1 在 11~13 h 时段的收益)，造成这种现象的原因主要是：集群划分方式 1 将储能和较多光伏电源“打包”在了一个集群(见图 9(a))，储能和光伏在光照较强的时间段、在目标函数的作用下协同出力抬高了售电收益；而在另外 2 种集群划分方式中，储能与电动汽车或风机打包在一个集群中，使得它们在 2 类资源作用较强的夜间时段抬高了电价。同理可分析得到，集群划分方式3在AVC的综合调控评价结果优于集群划分方式 1 和 2。



(a) 典型划分方式参与AGC调度的售电收益

(b) 典型划分方式参与AVC调度的售电收益

图 11 各新能源 24 h 的售电收益

Fig.11 Electricity sales revenue of each renewable resource within 24 h

仔细观察表 4 还可发现，在进行 AGC 调控时，集群划分方式 1 在售电收益、网络有功损耗和电压偏移率指标上均优于可调资源独立参与调度的方式，这是因为所提出的集群划分方式(尤其在解聚合过程中)同时考虑了功率跟踪效果、聚合主体售电收益，并从众多样本中遴选出了各方指标综合评价最优的集群划分方式，而一般可调资源以独立形式参与调度时仅考虑了指令跟踪效果(见附录 A；事实上，除指令跟踪精度外，若将其他性能指标纳入可调资源独立参与调度的调度模型也能获得较好的综合性能，但这将大幅增加调度难度和所需的通信软硬件投入)。同理分析可知，集群划分方式 3 在参与 AVC 调控时期的综合评价指标优于可调资源独立参与调度的方式。

4 结论

1）提出了一套同时兼顾配电网调度性能与聚合商收益的灵活性资源集群划分指标体系及实施策略。该体系通过融合 AGC/AVC 调度性能(指令跟踪精度、有功网损、电压偏移率)与售电收益指标，并采用层次分析-熵权法组合赋权，实现了电网运行效率与市场主体经济利益的均衡。

2）针对中低压配电网有功、无功-电压强耦合特性，提出了集群划分样本的生成与筛选方法。该方法基于综合电压灵敏度电气距离构造平均电气距离阈值，并满足连通性、完备性等约束，可有效筛选出电气联系紧密且具代表性的集群样本，为后续综合评价提供高质量样本。

3）在外特性计算环节中，提出了一种灵活性资源出力范围的降维简化模型，仅牺牲约 2%的跟踪精度即可使集群划分流程的平均运算耗时降低 12%；在解聚合环节，构建了以指令跟踪误差最小和经济收益最大为目标的模糊化目标函数。仿真表明，基于该方式获得的优秀集群划分方案，其指令跟踪性能与独立调控相当，同时经济收益提高 6.4%，有功网损和电压偏差率分别降低 1.2%和 0.6%。该方式显著提升了集群划分与调控的效率，所得结果更易被聚合商接受，可为电网运营部门约束聚合商无序行为提供理论依据。

未来研究可聚焦于：在该文所提架构上构建更完善的新型可调资源模型、引入动态学习机制提升样本的代表性以及结合电价短期预测实现考虑调度经济性的动态集群划分。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] KORAKI D, STRUNZ K. Wind and solar power integration in elec-

tricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 473-485.

[2] 李嘉媚，艾芊，殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：37-55.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-55.

[3] TAN Z F, ZHONG H W, WANG X Y, et al. An efficient method for estimating capability curve of virtual power plant[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 780-788.

[4] 何晋伟，王程锦，历成元，等. 新能源工业微电网运行控制问题分析及应对方案[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3762-3784.
HE Jinwei, WANG Chengjin, LI Chengyuan, et al. Typical problems in operation and control of renewable energy industrial microgrid: analysis and solutions[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3762-3784.

[5] 盛万兴，刘科研，李昭，等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：1-18.
SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 1-18.

[6] 周扬，王主丁，张漫，等. 适应分布式资源渗透率提高的配电网网元规划方法[J]. 电网技术，2025，49(1)：306-315.
ZHOU Yang, WANG Zhuding, ZHANG Man, et al. A grid cell based distribution network planning method adapting to the increasing permeability of distributed resources[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 306-315.

[7] 李运硕，盛万兴，段青，等. 新型配电网业务资源语义贯通关键技术研究[J]. 电网技术，2025，49(8)：3486-3500.
LI Yunshuo, SHENG Wanxing, DUAN Qing, et al. Research on key technologies for semantic connectivity of new distribution network business resources[J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3486-3500.

[8] 余洋，王研，吕廷彦，等. 分布式储能聚合建模及双层一致性调频策略[J]. 高电压技术，2026，52(3)：1159-1167.
YU Yang, WANG Yan, LÜ Tingyan, et al. Distributed energy storage aggregation modeling considering multiple influencing factors and two-layer consistent frequency regulation strategy[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(3): 1159-1167.

[9] DI SOMMA M, GRADITI G, SIANO P. Optimal bidding strategy for a DER aggregator in the day-ahead market in the presence of demand flexibility[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1509-1519.

[10] 袁晓冬，费骏韬，胡波，等. 资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(22)：17-26.
YUAN Xiaodong, FEI Juntao, HU Bo, et al. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 17-26.

[11] 李晓波，谢剑锋，张世乐. 基于集群划分的主动配电网电压无功两阶段鲁棒控制策略[J]. 中国电机工程学报，2025，45(18)：7058-7071.
LI Xiaobo, XIE Jianfeng, ZHANG Shile. A two-stage robust strategy for voltage/var control in active distribution networks based on cluster partitioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7058-7071.

[12] 王磊，张帆，寇凌峰，等. 基于 Fast Unfolding 聚类算法的规模化分布式光伏电源集群划分[J]. 太阳能学报，2021，42(10)：29-34.
WANG Lei, ZHANG Fan, KOU Lingfeng, et al. Large-scale distributed PV cluster division based on Fast Unfolding clustering algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 29-34.

[13] 郭自文，王子鉴，黄纯，等. 考虑源荷储功率协调和不确定性的配电网集群划分方法[J]. 电网技术，2026，50(3)：1082-1092.
GUO Ziwen, WANG Zijian, HUANG Chun, et al. A distribution network clustering method considering source-load-storage power coordination and uncertainty[J]. Power System Technology, 2026, 50(3): 1082-1092.

[14] 李明，吕金洲，亚夏尔·吐尔洪，等. 储能与风电集群联合日前-实时运行决策[J]. 高电压技术，2026，52(3)：1211-1221.
LI Ming, LÜ Jinzhou, TURHOUN A, et al. Energy storage and wind cluster joint day-ahead and real-time operational decision[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(3): 1211-1221.

[15] 何仰赞，温增银. 电力系统分析[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2010.
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power system analysis[M]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010.

[16] 张天策，李庚银，王剑晓，等. 基于可行域投影理论的新能源电力系统协同运行方法[J]. 电工技术学报，2024，39(9)：2784-2796.
ZHANG Tiance, LI Gengyin, WANG Jianxiao, et al. Coordinated operation method of renewable energy power systems based on feasible region projection theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2784-2796.

[17] 刘志凯，余绍峰，刘华，等. 支撑规模化可再生能源高效聚合的虚拟电厂运行方法研究[J]. 可再生能源，2024，42(2)：215-222.
LIU Zhikai, YU Shaofeng, LIU Hua, et al. Research on large-scale renewable energy efficient aggregation based on virtual power plant operation method[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(2): 215-222.

[18] 高洪超，李楚一，王冠雄，等. 聚合规模化 5G 基站的虚拟电厂动态构建与响应实证[J]. 电力系统自动化，2024，48(18)：47-55.
GAO Hongchao, LI Chuyi, WANG Guanxiong, et al. Dynamic construction and response demonstration of virtual power plant with aggregated large-scale 5G base stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 47-55.

[19] 姜华，杨知方，林伟，等. 计及分布式新能源不确定性的虚拟电厂调度边界概率分布刻画方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(15)：5565-5575.
JIANG Hua, YANG Zhifang, LIN Wei, et al. Probability distribution of dispatch region for a virtual power plant considering distributed renewable uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5565-5575.

[20] 许泽凯，刘罡，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.
XU Zekai, LIU Zhao, HE Jinghan, et al. Distributed resource aggregation and aggregate optimization operation method of multi-virtual power plant in new power distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 105-116.

[21] 王文悦，刘海涛，季宇. 虚拟电厂可调空间统一建模及其参与调峰市场的优化运行策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：74-82.
WANG Wenyue, LIU Haitao, JI Yu. Unified modeling for adjustable space of virtual power plant and its optimal operation strategy for participating in peak-shaving market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 74-82.

[22] CUI B, ZAMZAM A, BERNSTEIN A. Network-cognizant time-coupled aggregate flexibility of distribution systems under uncertainties[J]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(5): 9295337.

[23] 刘鑫，李扬，史云鹏，等. 计及用户参与不确定性的虚拟电厂分布

鲁棒优化模型[J]. 电力自动化设备，2022，42(7)：84-93.
LIU Xin, LI Yang, SHI Yunpeng, et al. Distributionally robust optimization model of virtual power plant considering user participation uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 84-93.

[24] 乔奕宁，肖飞，艾芊，等. 虚拟电厂需求侧灵活性资源聚合参与调峰的优化调度策略[J]. 电力自动化设备，2025，45(9)：190-199.
QIAO Yining, XIAO Fei, AI Qian, et al. Optimal dispatching strategy of demand-side flexible resource in virtual power plant for aggregately participating in peak shaving[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(9): 190-199.

[25] 于坤禹，宋晓通，张佳惠，等. 面向电力紧平衡场景的负荷协同调控策略[J]. 高电压技术，2026，52(4)：1712-1723.
YU Kunyu, SONG Xiaotong, ZHANG Jiahui, et al. Coordinated load regulation strategy in power tight balance scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(4): 1712-1723.

[26] MÜLLER F L, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1205-1214.



刘科研
1978—，男，博士，教授级高工，博导
主要从事配电网运行控制、复杂配电网仿真分析、配电大数据与数字孪生等领域关键技术研究
E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn

LIU Keyan
Ph.D., Professor



李　昭(通信作者)
1993—，男，博士，工程师
主要从事分布式电源配电网运行与控制、配电网仿真分析等领域关键技术研究
E-mail: lizhao1@epri.sgcc.com.cn

LI Zhao
Ph.D.
Corresponding author



张　鑫
2001—，男，硕士生
主要从事配电网优化运行与控制领域技术研究
E-mail: zx01@hnu.edu.cn

ZHANG Xin

收稿日期　2025-07-01　在线出版日期　2025-12-31　　编辑　程子丰

附录 A

有源配电网中灵活性资源以独立形式参与调控符合如下最优潮流模型：

响应上级电网有、无功功率指令时的目标函数为：

$$\min J=\min\left(\alpha\left|p_{\mathrm{pcc}}-p^{*}\right|+\beta\left|q_{\mathrm{pcc}}-q^{*}\right|\right) \tag{A1}$$

其中：p_{pcc} 和 q_{pcc} 分别为 PCC 点的有、无功功率；p^{*}和 q^{*}为有、无功功率指令值；α 和 β 分别表示跟踪有、无功功率指令的权重。系统的通用约束条件如下。

1）功率平衡约束：

$$\begin{cases} p_j=\begin{cases}\sum\limits_{k\in\delta(j)}P_{jk}-\sum\limits_{i\in\pi(j)}\left(P_{ij}-{I_{ij}}^{2}r_{ij}\right)+g_j{V_j}^{2},\\ \forall j\in B\end{cases}\\ q_j=\begin{cases}\sum\limits_{k\in\delta(j)}Q_{jk}-\sum\limits_{i\in\pi(j)}\left(Q_{ij}-{I_{ij}}^{2}r_{ij}\right)+b_j{V_j}^{2},\\ \forall j\in B\end{cases}\end{cases} \tag{A2}$$

式中：下标 i、j 和 k 表示配电网中不同的节点标号；p_i 和 q_i 分别表示从 i 节点注入电网的有、无功功率；$\delta(i)$和 $\pi(i)$为节点 i 下、上游节点集合；P_{ij} 和 Q_{ij} 表示支路 ij 首端的有、无功功率(方向为从首端流向末端)；B 表示网络节点的集合。

2）欧姆定律约束：

$${V_j}^{2}=\begin{cases}V_i^{2}-2\left(P_{ij}r_{ij}+Q_{ij}x_{ij}\right)\\ +{I_{ij}}^{2}\left({r_{ij}}^{2}+{x_{ij}}^{2}\right),\forall ij\in E\end{cases} \tag{A3}$$

式中：V_i 表示节点 i 的电压，I_{ij} 表示从节点 i 流向节点 j 的支路电流，且 V_i 和 I_{ij} 均具有上下限约束；r_{ij}，x_{ij} 分别表示支路 ij 的电阻、电抗，g_i 和 b_i 分别为节点 i 的并联电导和电纳；E 表示网络支路的集合。

3）支路功率约束：

$${I_{ij}}^{2}=\frac{{P_{ij}}^{2}+{Q_{ij}}^{2}}{V_i^{2}},\forall ij\in E \tag{A4}$$

(4)支路电流约束：

$${I_{ij}}^{\min}\le I_{ij}\le {I_{ij}}^{\max},\forall ij\in E \tag{A5}$$

(5)节点电压约束：

$$V_i^{\min}\le V_i\le V_i^{\max},\forall i\in B \tag{A6}$$

(6)节点注入功率的约束：

$$\begin{cases}p_i\in R_i^{p}\\ q_i\in R_i^{q}\end{cases},\forall i\in B \tag{A7}$$

式中：R_i^{p} 和 R_i^{q} 分别表示节点 i 的有、无功功率可调范围。

附录 B

图 5(b)中各资源的功率曲线来源为：光伏与风电实测于中国南部某大学屋顶光伏阵列及校园风机，采集时段为 2023 年夏季典型日；电动汽车充电功率实测于该校停车场某充电桩，采集时间为 2023 年夏季；小水电取自中国南方某径流式水电站 2022 年丰水期日出力记录。上述数据实际上是通过 HIOKI-3198 电能质量分析仪现场采集获得的，并将这些数据按小时取均值。

附录 C

考虑到日内控制中影响储能系统使用寿命的因素，本文还有如下两个约束：

1）储能系统日充/放电容量约束：

$$\sum_{t=1}^{T}\left|Q_t-Q_{t-1}\right|\le 4Q_{\max} \tag{C1}$$

该约束限制储能的日均循环次数不超过 2 次。

2）单次充/放电深度约束：

$$\left|Q_t-Q_{t-1}\right|\le 0.8Q_{\max} \tag{C2}$$

该约束限定储能系统单次充放电深度不超过其最大容量的 80%