

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.004

考虑灵活性资源可调容量和响应速度的集群划分方法

吕文琪, 刘子文, 董晓霄, 朱俊澎, 袁越
(河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为提升分布式电源规模化接入配电网的有序管控和灵活调节能力,合理地对分布式电源进行集群划分并以集群为基本单元进行调控是当下有效的管理手段。为此,文中提出考虑灵活性资源可调容量和响应速度的分布式电源集群划分方法。首先,提出能够表征集群结构性和功率平衡能力的模块度指标和有功平衡度指标。其次,在对集群灵活性响应能力进行分析的基础上,针对灵活性资源可响应容量和响应速度对调节能力的影响难以量化的问题,提出以集群出力响应曲线与净负荷曲线之间的偏差累积面积作为集群灵活性响应能力指标,并考虑了储能容量分配对集群划分的影响。然后,提出综合考虑模块度指标、有功平衡度指标、集群灵活性响应能力指标以及储能单元分配指标的集群划分目标函数,并利用改进自适应遗传算法进行求解。最后,在改进的 IEEE 33 和 IEEE 69 节点系统对文中所提方法进行验证。结果表明,基于所提综合性性能指标的集群划分方法在保证集群结构性强度的基础上,将集群灵活性响应能力提升 20% 以上,验证了文中所提集群划分方法的有效性和优越性。

关键词:分布式电源;集群灵活性;功率平衡;可调容量;响应速度;集群划分

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0037-11

0 引言

以光伏、风电为代表的分布式电源接入配电网可就近为用户供电,减少电能的大规模、远距离传输,弥补集中发电的不足^[1-2]。然而,由于分布式电源具有单体容量小、出力波动性强、可控性差、接入位置分散等特征,带来了电网线路与断面潮流反送、节点电压越限与波动等一系列问题^[3-6]。对配电网中的分布式能源、负荷以及储能等单元进行划分整合并形成具备调度控制功能和自治能力的集群,是实现和保障大规模分布式电源安全可靠、友好并网的有效解决方案^[7-9]。采用集群管理模式可以有效规避大规模分布式电源并网带来的风险,有利于发挥集群对配电网的调节作用。

合理设计划分指标是实现分布式电源集群划分的前提。集群划分指标大致可以分为结构性指标和功能性指标 2 类。结构性指标以群内节点联系紧密、群间节点联系松散为目标,而功能性指标与集群优化调控目标相配合,集中体现了集群的调节目的。根据不同的优化调控需求,不同研究中的功能指标会呈现出一定的区别和侧重点。目前分布式电源集群分组研究主要集中在依据节点间电气耦合性,考虑集群电压控制^[10-13]、有功平衡^[14-16]等控制指标,而针对分布式电源集群在电网中调频、调压、调峰等控制目标和网络拓扑的集群分组方法研究较少见到。要实现高渗透率分布

式电源的有序、可靠并网,有效实现分布式集群的自治和调度控制,不仅要考虑分布式电源时空分布特性、分布式电源出力和负荷不确定性,还要考虑分布式电源提供快速调频、调压、调峰等控制的能力和网络拓扑等因素,这将大大增加集群分组的复杂度。为了充分发挥集群的可控潜力,亟须开展针对分布式发电集群灵活性调节能力量化评估指标的研究^[17-19]。

由于灵活性调节资源具有多特性耦合和表征的特征,以往研究中往往采用多指标来衡量系统的灵活性能力^[20-21]。目前的研究在集群划分过程中引入灵活性指标时主要关注灵活性资源的可响应容量的影响^[22-23]。针对响应速度,文献[24]提出采用可调幅值、持续时间、服务成本等指标描述系统的灵活性能力;文献[25]采用灵活性供需平衡指标和灵活性平衡时间指标量化集群的灵活性平衡特性,但均侧重于整个周期内调节响应时长的量化描述,未提出针对响应速度的具体划分指标。文献[26]对集群的等效惯量响应速度进行归一化,形成了集群的惯量响应速度指标;文献[27]根据集群内各个分布式电源的可响应容量和响应时长得到集群的等效响应速度指标,但对于集群响应速度的量化均是依据不同节点的响应速度和固定取值的单位响应时长,所得到的量化结果偏保守,无法直观地体现各单元响应速度对于集群整体灵活性调节能力的影响。

因此,文中针对大规模分布式电源接入配电网后难以有序管控和灵活性降低的问题,提出考虑集

收稿日期:2024-04-12;修回日期:2024-06-09

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20221165)

群灵活性响应能力的分布式电源集群划分方法,以规避大规模分布式电源并网带来的风险,并发挥集群对配电网的调节作用。在分析集群可响应容量及响应速度差异对集群灵活性响应能力影响的基础上,提出将能够综合反映集群响应速度以及可响应容量的偏差累积面积作为集群灵活性响应能力指标,从而构建考虑集群结构、有功平衡以及灵活性响应能力的集群划分综合指标体系,最后采用改进遗传算法,在算例中验证所提划分方法的有效性以及划分后集群的灵活性。

1 集群划分指标

1.1 模块度指标

采用基于电气距离的模块度指标作为集群的结构性指标^[28],对划分后的集群结构特性进行量化评价。模块度指标的取值范围为 $[-1, 1]$,其值越大,则集群内部联系越紧密,而集群间联系越松散。

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \frac{K_i K_j}{2m} \right) \delta(C_i, C_j) \quad (1)$$

式中: ρ 为模块度指标; A_{ij} 为连接节点*i*与*j*的边的权值; K_i 、 K_j 分别为所有与节点*i*和*j*相连的边的权值和; C_i 、 C_j 分别为节点*i*和*j*所在的集群; δ 为0-1函数,若 $C_i = C_j$,则 $\delta(C_i, C_j) = 1$,否则为0; m 为网络边数和。

选取基于无功灵敏度计算的电气距离可以较好地反映系统的网络结构特性。基于无功电压灵敏度矩阵的电气距离表达如式(2)所示。

$$D_{QV,ij} = \sqrt{\sum_n (S_{QV,in} - S_{QV,jn})^2} \quad (2)$$

式中: $D_{QV,ij}$ 为节点*i*、*j*之间基于无功电压灵敏度的电气距离; n 为系统中的节点个数; $S_{QV,in}$ 、 $S_{QV,jn}$ 分别为节点*i*、*j*与其相连节点的无功电压灵敏度系数。

因此,模块度指标中 A_{ij} 的表达如式(3)所示。

$$A_{ij} = 1 - \frac{D_{QV,ij}}{\max D_{QV,ij}} \quad (3)$$

1.2 有功平衡度指标

为了减少集群间的大规模功率流动,充分发挥集群的自治能力,可以采用有功平衡度指标对网络中的节点划分进行调整。集群的有功平衡度指标值越大,则集群内部各节点间的互补特性越好,在一定程度上可促进分布式可再生能源的自消纳并且降低集群内的功率调节需求。对于单个集群来说,其有功平衡度的表达如式(4)所示。

$$\gamma_{P,c} = \begin{cases} 0 & |P_m - P_n| \geq P_n \\ 1 - \frac{|P_m - P_n|}{P_n} & |P_m - P_n| < P_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\gamma_{P,c}$ 为第*c*个集群的有功平衡度; P_m 为集群内所有有功电源可提供的有功出力; P_n 为集群内所有有功负荷的总和。

该指标利用集群内有功出力和有功负荷之间的偏差大小来衡量集群的有功平衡程度,取值范围为 $[0, 1]$ 。特别地,当有功出力等于有功负荷时,有功平衡度取值为1,当两者偏差大于有功出力时,有功平衡度取值为0。

因此,集群有功平衡度指标的表达式如式(5)所示。

$$\varphi_P = \frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} \gamma_{P,c} \quad (5)$$

式中: φ_P 为集群有功平衡度指标; N_c 为总集群数。

1.3 灵活性响应能力指标

1.3.1 集群灵活性的概念

根据电力系统的灵活性评价方法^[29],可对集群的灵活性定义如下:在所关注时间尺度的功率平衡中,集群通过优化调配群内各类灵活性资源,以一定成本适应集群内负荷变化的能力。集群灵活性具有方向性,以适应功率上调或下调的需求。同时,集群灵活性的来源多样,不同灵活性资源在响应速度上呈现较明显的差异,任意时刻某一灵活性资源的可响应容量也与其当前的状态有关。对集群灵活性能力的评价往往建立在对集群灵活性资源和灵活性需求分析的基础之上,主要与集群的灵活性供给能力以及响应时间等有关。

1.3.2 集群灵活性响应能力分析

配电网中的各种可调节小水电、燃气轮机等都是集群灵活性能力的重要来源。在未满载的情况下,可调节的常规机组可以对系统波动做出上调或下调的响应。常规机组的功率调节能力受到其机组容量和爬坡速率等因素的共同影响。

为了应对风光及负荷波动引起的功率不平衡问题并考察各集群在系统发生扰动时维持功率平衡的能力,在考虑各个可调节机组响应性能差异的基础上对集群响应负荷波动的特性进行分析。为便于分析,以简化后的负荷阶跃式变化为例,在一天24 h的研究周期内对时段进行划分后,计及原始负荷以及不参与调节的分布式电源的净负荷曲线可以近似成一条阶梯曲线,净负荷的变化反映了风电、光伏以及系统负荷的波动情况。当净负荷发生变化时,各灵活性资源将随之进行出力调整以维持系统功率平衡。集群响应特性曲线根据响应条件的差异将呈现不同的变化趋势,以净负荷增加为例,忽略灵活性资源的反应延时,集群响应特性曲

线的变化趋势如图1所示。图中, L_1 为无可响应容量时的响应特性曲线; L_2 为单一或多种灵活性资源以稳定爬坡速度进行负荷跟踪时的响应特性曲线; L_3 为系统中存在多种响应容量有限的灵活性资源时的响应特性曲线。

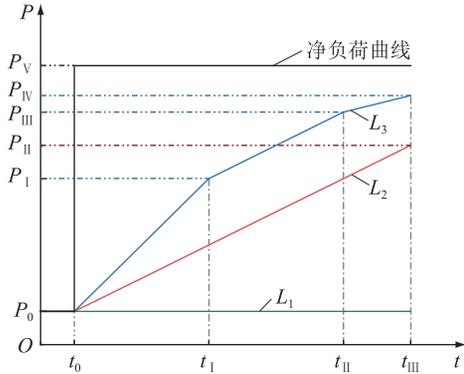


图1 集群响应特性曲线变化趋势

Fig.1 Change trend of cluster response characteristic curve

由图1可见,考虑各个可调节能源的爬坡速度及可响应容量的差异,集群的响应特性曲线大致可以分为3类:(1)无可响应容量,响应特性曲线可近似看作斜率为零的线段;(2)单一或多种灵活性资源以稳定爬坡速度进行负荷跟踪,响应特性曲线可近似看作斜率大于零的线段;(3)系统中存在多种响应容量有限的灵活性资源,响应特性曲线可近似为多条斜率逐次降低的线段首尾相接而成的折线,折线上的折点代表某些设备的可响应容量耗尽,系统的总爬坡速度随之降低。在一次响应过程中,当系统可响应容量耗尽或源荷达到平衡后,集群的有功出力将保持稳定。

在理想情况下,集群的出力应能实时对净负荷进行跟随,即集群的出力曲线和净负荷曲线趋近于重合。然而在现实情况中,集群的响应总是滞后于负荷变化,集群的响应效果也会受到集群内各灵活性资源的爬坡速度及可响应容量的影响,集群的出力曲线可以近似看作以折线形式对净负荷进行追随的曲线。集群的响应速度和可响应容量将会直接影响集群出力曲线和净负荷曲线的偏离程度。

(1)可响应容量差异。可响应容量不足会对集群响应效果产生明显的影响,可响应容量差异影响下的响应特性曲线如图2所示。

图2(a)中,在响应速度相同的情况下,可响应容量不足的曲线 S_2 在未达到要求功率的 t_{II} 时刻进入稳定输出状态,在该时段剩余时间内不再跟随净负荷功率,持续处于功率不平衡状态。从整个研究

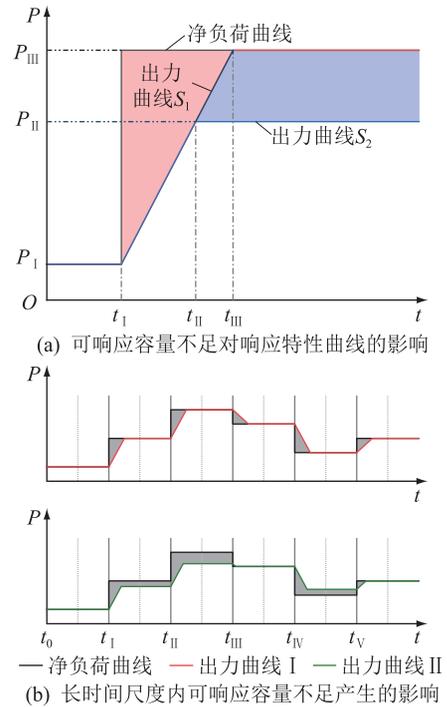


图2 可响应容量差异影响下的响应特性曲线

Fig.2 Response characteristic curves under different response capacities

周期来看,每个时段的调节需求将受到当前时段需求与上一时段剩余调节需求的共同影响。图2(b)中, t_1-t_{II} 时段的可响应容量不足加剧了下一时段的功率调节难度,而 $t_{II}-t_{III}$ 时段的功率不平衡反而降低了下一时段的调节需求,可见相邻时间段的功率调节需求存在一定的相关性。

(2)响应速度差异。响应速度差异影响下的响应特性曲线如图3所示。

图3(a)中,从负荷发生波动的 t_1 时刻开始,出力曲线 S_3 的响应速度总大于曲线 S_4 的响应速度,因此也优先实现了功率平衡。从曲线偏离程度上来看,曲线 S_4 与净负荷曲线的偏离程度更大。从偏差面积上来看,出力曲线 S_4 与净负荷曲线包围而成的面积更大。在可响应容量充足的情况下,若系统内灵活性资源的响应速度较慢,则系统的响应特性变差,该趋势在图像中反映为出力曲线与净负荷曲线包围面积的增大,如图3(b)所示。当集群的响应速度过慢时,也会出现因某时段调节任务未完成而影响下一时段调节需求的情况,如出力曲线IV所示。

1.3.3 集群灵活性响应能力指标

由1.3.2节的分析可知,集群响应速度低和可响应容量少都会导致集群出力曲线和净负荷曲线之间的偏离程度加大,加剧系统的功率不平衡。相反地,若集群具有足够高的响应速度和充足的

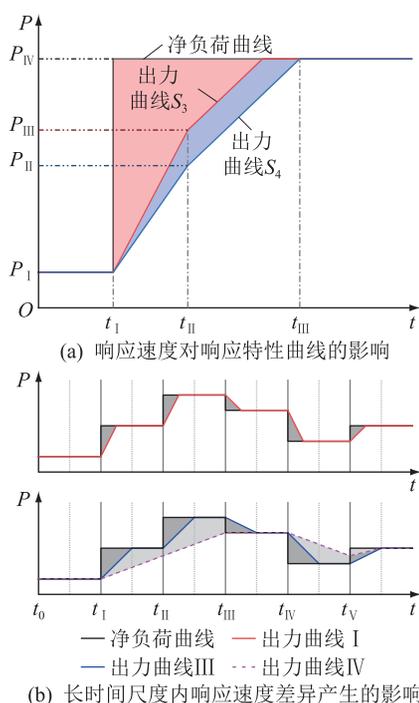


图3 响应速度差异影响下的响应特性曲线
Fig.3 Response characteristic curves under different response speeds

可响应容量, 集群出力曲线和净负荷曲线之间应有无限靠近的趋势。为了对集群周期内的响应能力进行量化分析, 可以采用集群出力曲线和净负荷曲线所围成的面积 S_{dev} 来反映集群的灵活性响应效果。

$$S_{dev} = \int_0^T |P_L(t) - P_C(t)| dt \quad (6)$$

式中: T 为研究周期; $P_L(t)$ 为 t 时刻集群的净负荷; $P_C(t)$ 为 t 时刻集群的出力; S_{dev} 为响应曲线偏离面积, 表示时间 T 内集群出力 $P_C(t)$ 和净负荷 $P_L(t)$ 偏差的累积大小, 能够同时表征集群可响应容量的充裕度和响应速度的影响。

基于上述分析提出集群灵活性响应能力指标 φ_F , 具体表达如式(7)所示。

$$\varphi_F = 1 - \frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} \frac{S_{dev,c}}{S_{dev,0}} \quad (7)$$

式中: $S_{dev,c}$ 为第 c 个集群的响应曲线偏离面积; $S_{dev,0}$ 为无调节手段下的出力曲线偏离面积。

$$S_{dev,0} = \int_0^T |P_{l0}(t) - P_{g0}(t)| dt \quad (8)$$

式中: P_{l0} 为集群净负荷; P_{g0} 为无调节手段下集群内所有有功电源的总出力。此时储能设备无充放电行为。

集群的响应速度和可响应容量发生变化时将通过改变各时段集群出力曲线的变化趋势来影响总的响应曲线偏离面积, 因此采用基于响应曲线偏

离面积的灵活性响应能力指标能够反映集群响应速度和可响应容量的动态变化过程, 并且充分考虑了相邻时段状态的相关性。集群灵活性响应能力指标的取值为 $[0, 1]$, 值越大则系统响应负荷波动的能力越好, 也说明集群的响应速度和可响应容量都在较佳的水平。

1.4 储能单元分配指标

储能设备具有双向调节功能, 但可响应时间有限且受其充放电过程影响, 因此单独对储能单元设置划分指标。配置一定容量的储能装置可以有效提高集群的灵活性响应能力^[30], 为了在各集群间合理地分配储能容量, 最大程度地改善区域及总体的灵活性水平, 可以采用储能单元分配指标 σ_s 作为集群划分的判据之一, 其表达如式(9)所示。

$$\sigma_s = 1 - \frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} \left| \frac{S_{dev,c}}{\sum_{c=1}^{N_c} S_{dev,c}} - \frac{E_{s,c}}{\sum_{c=1}^{N_c} E_{s,c}} \right| \quad (9)$$

式中: $E_{s,c}$ 为第 c 个集群内所有储能设备容量之和。

储能单元分配指标的取值范围为 $[-1, 1]$, 值越大则配网中的储能设备在各个集群间的分配越合理, 灵活性响应能力差的集群将分配到更大容量的储能设备, 以缓解集群灵活性缺额问题。

1.5 集群划分目标函数

基于上述对各集群划分指标的分析, 为了充分发挥集群的自治能力及调动灵活性资源以维持系统有功平衡的能力, 文中提出综合考虑模块度指标、有功平衡度指标、集群灵活性响应能力指标以及储能单元分配指标的目标函数 V , 其表达如式(10)所示。

$$V = \max(k_1\rho + k_2\varphi_P + k_3\varphi_F + k_4\sigma_s) \quad (10)$$

式中: k_1, k_2, k_3, k_4 分别为模块度指标、有功平衡度指标、集群灵活性响应能力指标以及储能单元分配指标的权重, 且 $k_1+k_2+k_3+k_4=1$ 。

各项指标中, 基于电气距离的模块度指标保证了系统的结构性, 是最基本的划分指标, 一般占有较大的权重。有功平衡度指标是实现集群功率自治的基础, 在各项功能性指标中占有较重要的地位。在集群实现功率平衡的基础上, 可充分利用储能等资源的可调能力参与系统的灵活调节, 当系统中具有较多的可调资源和较大的调节潜力时, 可以适当提高灵活性响应能力的指标权重。与此同时, 对于实际中可能出现的某些分布式电源接入点附近并不包含灵活性资源的情况, 文中所提出的综合指标能够使集群在划分过程中通过扩大集群规模的方式进一步寻求可调资源, 并在灵活性指标值较

低的情况下向有功平衡度指标值增加的方向发展从而降低集群参与功率灵活调节的需求,提升集群对自身功率平衡的关注。

2 集群划分算法

遗传算法是解决集群划分问题最常用的智能算法之一。综合了多项功能性指标和结构性指标的目标函数将集群划分问题转换为求解函数最大值的优化问题,因此可以采用基于遗传算法的集群划分方法来寻求最佳的集群划分方案。

传统遗传算法采用固定的交叉概率与变异概率,优质个体与劣质个体将进行相同概率的交叉和变异操作,不利于优良个体的保存以及劣质个体的淘汰,大大降低了遗传算法的全局寻优性能。为了克服这个问题,可以采用引入自适应操作的改进遗传算法^[31-32],设置动态变化的变异概率与交叉概率,其表达分别如式(11)和式(12)所示。

$$P_m = \begin{cases} n_1 \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ n_2 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_c = \begin{cases} n_3 \frac{f_{\max} - f_m}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f_m \geq f_{\text{avg}} \\ n_4 & f_m < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_m 、 P_c 分别为算法的变异概率和交叉概率; f_{\max} 为种群的最大适应度值; f_{avg} 为种群的平均适应度值; f 为待进行变异操作个体的适应度值; f_m 为待进行交叉操作的两个体间较大的适应度值;系数 n_1 、 n_2 取值为1.0;系数 n_3 、 n_4 取值为0.5。

动态参数的设置使得不同个体的变异和交叉概率随着自身的适应度呈现线性变化,在群体适应度集中时增大变异交叉概率,提升群体的多样性,防止陷入局部最优解;在群体适应度分散时减小变异交叉概率,提升收敛速度。此外,为了防止最优个体无限繁殖,一般还须设置默认变异参数。通过采用自适应变化的变异交叉概率可以有效提升算法的效率和搜索全局最优解的性能。

改进遗传算法求解集群划分问题的具体流程如图4所示,其中输入的基本参数包括系统中各节点的类型、出力和负荷情况,以及各类灵活性资源的功率可调区间和调节速度。最终的集群划分目标函数将作为改进遗传算法的适应度函数来判断群体中个体的优劣程度从而实现个体间的优胜劣汰,当最优个体的适应度达到了给定阈值或者迭代次数达到了预设值后,算法将终止。最终获得的划分结果将作为集群划分的依据。

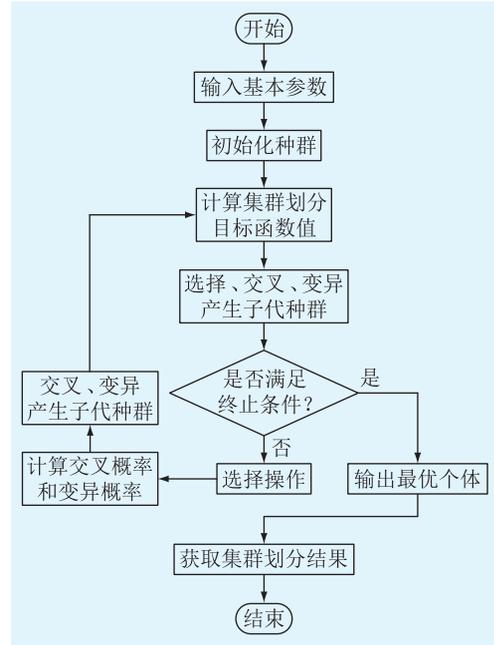


图4 基于改进遗传算法的集群划分流程

Fig.4 Cluster partitioning flow chart based on improved genetic algorithm

3 算例分析

3.1 算例一

3.1.1 算例介绍

为了验证文中所提集群划分方法的有效性,采用图5所示改进 IEEE 33 节点系统作为算例分析对象。

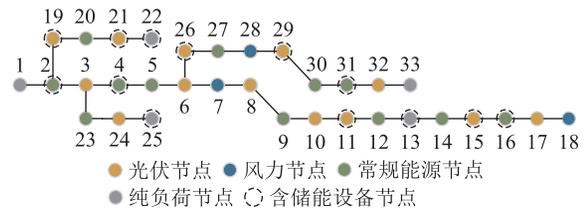


图5 改进的 IEEE 33 节点系统

Fig.5 Improved IEEE 33-node system

如图5所示,该系统包含13个分布式光伏节点、3个分布式风力节点、12个小水电等常规能源节点以及5个纯负荷节点。其中包含储能单元的节点有13个,主要为应用在分布式发电侧、用户侧等地的容量较小的分布式储能系统。系统中的光伏总装机量为2500 kW,风电总装机量为600 kW,小水电等常规能源总容量为3800 kW,储能总容量为690 kW。算例系统中可调资源总容量为3650 kW,各机组的调节速度在40 kW/min到100 kW/min不等,分布式电源容量渗透率超过50%,以模拟大规模分布式电源接入场景下系统的实时功率调节难度。

改进的 IEEE 33 节点系统的典型日总负荷及出力曲线如图 6 所示。

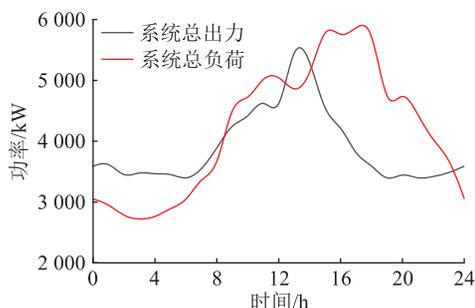


图 6 系统总负荷及出力曲线

Fig.6 System total load and output curves

为了充分考虑集群的功率自治能力,算例系统中的总出力曲线为未考虑上级电网介入以及各类可调资源参与调节时的情况,因此某些时段出现了较明显的功率不平衡现象。由于较高的光伏渗透率,系统的总出力曲线总体上呈现较明显的单峰趋势,在中午时段出现了一天中的出力高峰。在 23 时一次日 8 时的负荷低谷时段以及 13 时左右的出力高峰时段,系统总负荷低于系统总出力,其余时间内系统总负荷基本大于系统出力。由图 6 可知,该系统在一天之内将会反复出现功率上调或下调需求,在负荷长时间大幅度高于出力的下午至夜间易出现灵活性资源可调容量及调节速度不足。

3.1.2 集群划分结果

采用图 4 的自适应遗传算法对系统进行集群划分计算,仿真求解通过 MATLAB 实现。在遗传算法中设定种群规模为 300,最大迭代次数为 500。

不同的权重设置会影响集群划分的结果,表 1 为 3 种权重设置方案下的不同计算结果。其中方案一为仅考虑模块度指标的划分情况,各项指标权重设置为 $k_1=1, k_2=k_3=k_4=0$;方案二为兼顾模块度指标与有功平衡度指标的划分情况,各项指标权重设置为 $k_1=k_2=0.5, k_3=k_4=0$;方案三为采用了综合考虑模块度、有功平衡度、灵活性响应能力以及储能单元分配指标的划分情况,各项指标权重设置为 $k_1=0.5, k_2=k_3=0.2, k_4=0.1$ 。

表 1 集群划分指标计算结果

Table 1 Calculation results of cluster partition indicators

方案	ρ	φ_P	φ_F	σ_S
一	0.649 6	0.569 9	0.479 0	0.827 3
二	0.637 3	0.768 7	0.577 3	0.901 6
三	0.625 1	0.767 3	0.633 0	0.919 3

由表 1 可见,3 种方案的模块度指标值均在 0.6 以上,表明 3 种方案下的集群划分均具有较强的结

构性。方案一由于仅考虑模块度指标,指标值计算结果为 0.649 6,相比其他方案较大,说明划分后集群内的节点电气联系最强。方案二的各集群构成与方案一类似,仅出现少数集群边缘节点的归属变动。在方案三的划分结果中,由于对集群有功平衡、灵活性响应能力的需求变大,因此原方案一的集群 4 被拆分为 2 个小集群,集群 2 和集群 5 包含的大部分节点在方案三中构成了一个大的集群。

各方案对应的节点划分情况如图 7 所示。

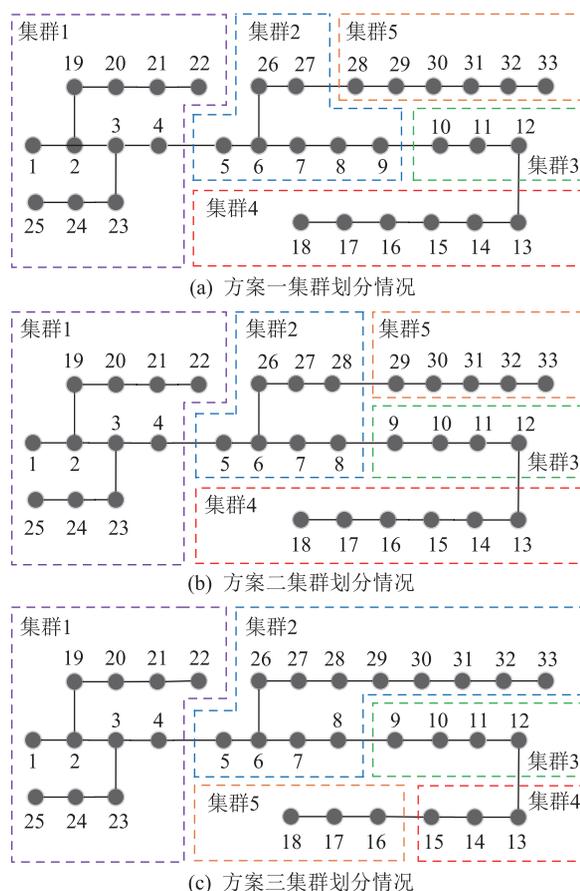


图 7 各方案下的集群划分结果

Fig.7 Cluster partitioning result of each scheme

集群的有功出力 and 负荷相对之差可以反映集群内的有功平衡水平,各方案下的源荷之差相对百分比如图 8 所示。

由图 8 可见,方案一所划分出的集群在功率互补上的表现较差,源荷之差相对百分比在一天之中大部分时间都超过了 40%。方案二与方案三有功平衡水平相近,源荷之差相对百分比在大部分时间都能够维持较低的水平,体现了以有功平衡度指标来衡量集群内功率平衡水平的有效性。

各方案在灵活性响应能力的表现上存在较大的差异,3 种方案下的集群功率调节需求以及灵活性资源分布情况如图 9 所示。

由图 9 和表 1 可见,由方案一划分出的各集群

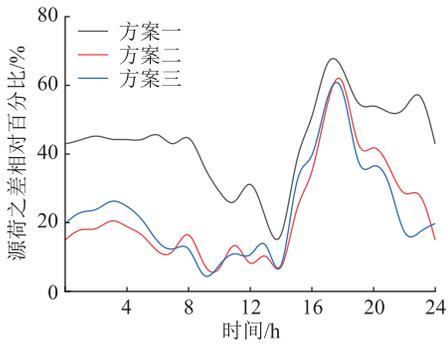


图8 各方案源荷之差相对百分比

Fig.8 Difference between output and load as a percentage of total output under each scheme

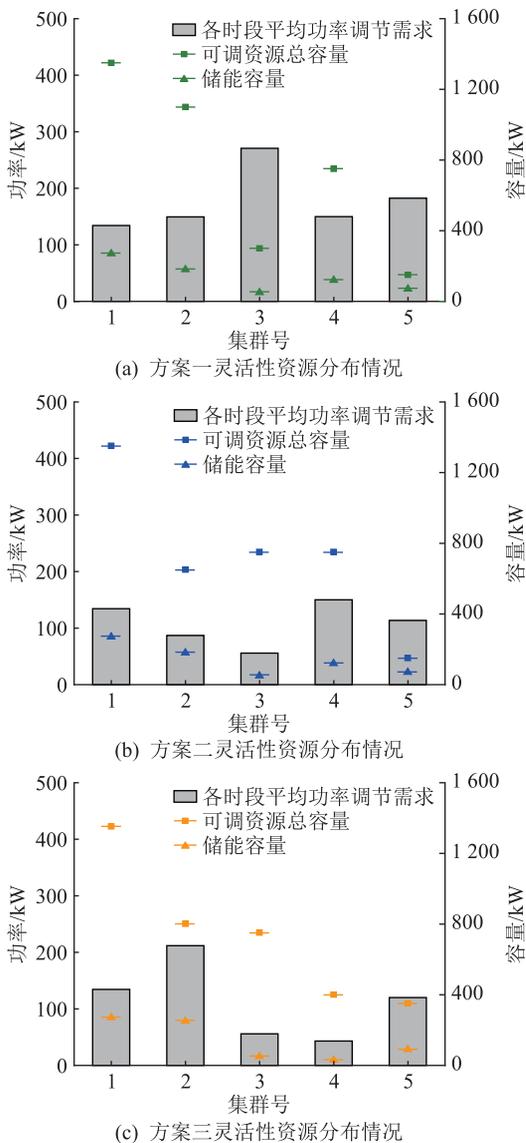


图9 灵活性资源分布情况

Fig.9 Flexible resource distribution

在灵活性资源分布上存在明显的不合理, 集群3和集群5功率调节需求最大, 分别为270.69 kW以及182.50 kW, 但配备的可调资源容量不能满足调节需求, 分别只有300 kW和150 kW, 且最大调节速度仅

有60 kW/min和40 kW/min。此外, 集群3和集群5中的储能容量分别仅有50 kW和70 kW, 调节需求较小的集群1、2、4占有了系统中的大部分可调资源及储能设备。由于方案一仅考虑结构性特征, 划分后的各集群的群内源荷互补特性较差, 对灵活性调节资源的需求增加, 更容易出现可调资源不足的情况, 因此灵活性响应能力较差。

相对于方案一, 方案二各集群的功率调节需求明显缓解, 均在150 kW以下。尽管集群1—集群4的平均功率调节需求和灵活性资源储备之间匹配度不高, 但由于这4个集群的可调资源储备都较多, 均超过650 kW, 且最大可调节速度均高于140 kW/min, 因此灵活性响应性能仍然能达到较好的水平。相对于其他集群, 集群5的灵活性表现是最差的, 平均功率调节需求为113.41 kW, 而可调资源总容量仅有150 kW, 储能容量也仅有70 kW, 难以完成大部分时段的调节任务。方案二兼顾结构性指标及有功平衡度指标, 有较好的群内互补特性, 对于灵活性调节资源的需求相对较小, 因此即使在划分阶段并未考虑灵活性, 仍具有优于方案一的灵活性响应能力。

相对于其他方案, 方案三在灵活性划分上最合理。方案三将系统中的33个节点划分为了5个集群, 其中集群1和2是节点数超过10的大集群, 而集群3、4、5是节点数较少的小集群。2个大集群的功率调节需求较高, 分别为134.11 kW和211.31 kW, 同时也占有较多的灵活性调节资源, 分别为1350 kW和800 kW, 同时最大可调节速度均高于250 kW/min。集群3、4的调节需求较小, 可调资源和储能容量也较少。相对其他集群, 集群5的灵活性调节能力较弱, 平均功率调节需求为119.69 kW, 可调资源总容量为350 kW, 储能容量为90 kW, 但仍然要明显优于方案一的集群3、5及方案二的集群5。可见, 各集群间灵活性响应能力差异大、可调资源分配不合理的情况在方案三中得到了有效改善。因此, 从整体上来看, 方案三划分后各集群的灵活性调节需求和灵活性资源储备匹配度更高, 缓解了集群的灵活性缺额情况, 实现了灵活性可调资源在各集群间的合理分配。

综上所述可知, 文中所提出的集群划分方案, 能够在考虑分布式电源结构性的基础上兼顾集群的有功平衡以及灵活性响应能力特征, 实现灵活性资源在集群间的合理分配和集群功率自治能力的提升, 有助于提高分布式电源集群在有功出力及负荷波动情况下的功率平衡和快速调节能力, 充分挖

掘分布式电源集群的可调控潜力,为后续开展集群参与的配网有功优化调度提供有效技术支持。同时,可根据实际配电网管理需求调整各指标的权重以获得不同调控目标下期望的集群划分结果。

3.1.3 算法性能对比

为验证算法性能,分别采用标准遗传算法和改进自适应遗传算法对改进 IEEE 33 节点系统的模块度划分结果进行求解。设置种群规模为 100,迭代次数为 200,2 种算法下的计算结果如图 10 所示。

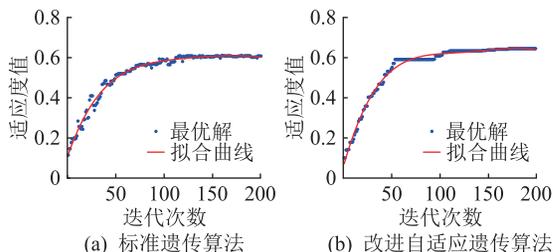


图 10 算法性能对比

Fig.10 Algorithm performance comparison

由图 10 可见,对比标准遗传算法,改进自适应遗传算法在生成的初始种群适应度较差的条件下经过 200 次的迭代得到了更优的解。从每一代最优解的变化过程上来看,标准遗传算法在寻优过程中表现出较强的随机性;而改进自适应遗传算法具有较强的跳出局部最优解的能力和全局寻优能力,在寻优过程中表现出一定的策略性。随着配网规模的进一步扩大和系统中节点数的增加,改进自适应遗传算法在搜索全局最优解上的能力将使其在求解复杂系统的集群划分问题上具有更加明显的优势。

3.2 算例二

为了进一步体现所提集群划分指标和算法的有效性,利用改进的 IEEE 69 节点系统算例进行再次验证。如图 11 所示,该系统包含 27 个分布式光伏节点、9 个分布式风力节点、26 个小水电等常规能源节点以及 7 个纯负荷节点。69 节点中包含储能单元节点 27 个。系统中光伏总装机量为 5 100 kW,风电总装机量为 1 300 kW,小水电等常规能源总容量为 7 950 kW,储能总容量为 1 420 kW。系统中的可调资源总容量为 7 500 kW,分布式电源容量渗透率约为 50%。

分别采用模块度划分方法以及文中所提考虑灵活性响应能力的集群划分方法进行求解,各项集群划分指标计算结果如表 2 所示。其中方案一为模块度划分方法,各项指标权重设置为 $k_1=1, k_2=k_3=k_4=0$;方案二为文中所提考虑集群灵活性响应能力

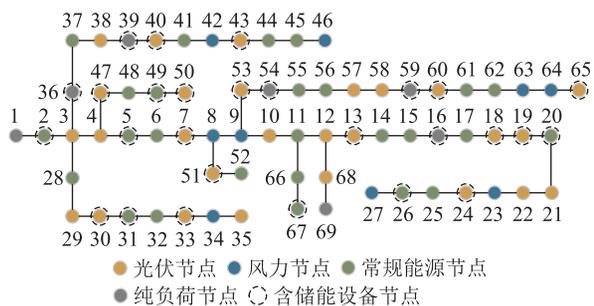


图 11 改进的 IEEE 69 节点系统

Fig.11 Improved IEEE 69-node system

的集群划分方法,各项指标权重设置为 $k_1=0.5, k_2=k_3=0.2, k_4=0.1$ 。各方案对应的节点划分情况如表 3、表 4 所示。

表 2 集群划分指标计算结果

Table 2 Calculation results of cluster partitioning indicators

方案	ρ	φ_P	φ_F	σ_s
一	0.595 1	0.756 7	0.529 5	0.951 6
二	0.542 1	0.801 7	0.641 6	0.931 4

表 3 方案一集群划分情况

Table 3 Cluster partitioning results of scheme 1

集群号	包含节点	节点数
1	1—5、28、29、36、37、47、48	11
2	6—13、51—56、66—69	18
3	14—27	14
4	30—35、38—41、49、50	12
5	42—46	5
6	57—65	9

表 4 方案二集群划分情况

Table 4 Cluster partitioning results of scheme 2

集群号	包含节点	节点数
1	1—5、28、29、36、37、47、48	11
2	6—11、49—56、66—69	18
3	12、13、16—27、57—65	23
4	14、15、30、31	4
5	32—35、38—46	13

由划分结果可见,对比方案一,方案二对应的模块度指标和储能单元分配指标值有小幅下降,而有功平衡度指标和集群灵活性响应能力指标值上升,说明根据文中所提的综合性能指标划分出的各集群在功率自治能力和灵活性响应能力上均有所提升,所提集群灵活性响应能力指标能够有效实现灵活性可调资源在各集群间的合理分配,进一步验证了文中所提集群划分指标的有效性。

此外,由表 3 和表 4 可见,采用综合性能指标划

分出的集群个数少于单一模块度指标划分后的集群个数且出现了节点数较多的大型集群,这是由于功能指标强节点间的互补特性,在划分过程中表现为聚集节点,因此在实际划分应用中可以根据理想的集群个数及规模合理调整结构性指标和功能指标之间的权重关系。

4 结论

为了提高集群的自治能力以及灵活性响应能力,文中提出了包括模块度指标、有功平衡度指标、集群灵活性响应能力指标以及储能单元分配指标的集群综合划分指标,并采用改进遗传算法分别在改进 IEEE 33 和 IEEE 69 节点系统中进行了仿真分析。文中主要结论如下:

(1) 文中提出以集群出力响应曲线与净负荷曲线之间的偏差累积面积作为集群灵活性响应能力指标,解决了灵活性资源可响应容量和响应速度难以表征的问题,实现了对集群灵活性调节能力的量化评估,为后续发挥集群灵活性调控潜力奠定了基础,也为配电网中的灵活性资源配置提供了参考。

(2) 算例结果表明,对比模块度划分方法,采用文中所提综合性能指标进行集群划分后,IEEE 33 节点系统的模块度指标下降了 3.77%,而集群有功平衡度指标、灵活性响应能力指标以及储能单元分配指标分别提升了 34.64%、32.15% 以及 11.12%; IEEE 69 节点系统的模块度指标和储能单元分配指标分别下降了 8.91% 和 2.12%,而有功平衡度指标和灵活性响应能力指标分别提升了 5.95% 和 21.17%。因此,文中所提方法能够保证集群具有较强的结构性和较好的群内源荷互补特性,提高集群的自治能力。同时,所提灵活性响应能力指标能够通过调整不同资源在各集群间的合理分配,有效增强集群的综合调节能力。

(3) 文中所提方法通过集群划分,能够实现各集群功率自治能力和灵活性调节能力的提升,但并不会改变配电系统的潮流分布。通过调整各指标的权重可以为不同划分场景和目标提供多样化的集群划分方案,从而提升集群的可调控潜力,降低配网调度的复杂度,为配电网的优化调控方案设计提供一定的参考。

参考文献:

[1] 郝文斌,孟志高,张勇,等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to

the distribution network with the background of a new power system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.

- [2] 吴桐,刘丽军,林钰芳,等. 基于动态分区的配电网日前优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 21-32.
WU Tong, LIU Lijun, LIN Yufang, et al. Day-ahead optimal dispatch for a distribution network based on dynamic partitioning [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 21-32.
- [3] 梁志峰,叶畅,刘子文,等. 分布式电源集群并网调控:体系架构与关键技术[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3791-3802.
LIANG Zhifeng, YE Chang, LIU Ziwen, et al. Grid-connected scheduling and control of distributed generations clusters: architecture and key technologies [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3791-3802.
- [4] 吕风仪,曾次玲,叶文浩,等. 含分布式电源并网的配电网电压波动特性分析[J]. 电气自动化, 2021, 43(1): 81-84.
LYU Fengyi, ZENG Ciling, YE Wenhao, et al. Analysis on voltage fluctuation characteristics of the distribution network with distributed generation connection [J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 81-84.
- [5] 郭沛,王利利,李猛,等. 基于灵敏度聚类的含 DG 配电网电压分区控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 100-107.
GUO Pei, WANG Lili, LI Meng, et al. Voltage partition control method for distribution network with DG based on sensitivity clustering [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 100-107.
- [6] 方榆冬,徐峰,李跃辉,等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 13-19.
FANG Yudong, XU Feng, LI Yuehui, et al. An optimization method for setting value of inverse-time overcurrent protection in distribution network with DG based on MPSO [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 13-19.
- [7] 盛万兴,吴鸣,季宇,等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186.
SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [8] 曹敬,金玉龙,郑涛,等. 计及分布式电源集群不确定性的配电网分散鲁棒电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 155-166.
CAO Jing, JIN Yulong, ZHENG Tao, et al. A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation clusters [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 155-166.
- [9] 陈灵,黄兴华,张功林,等. 考虑削峰填谷的分布式电源集群协同控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 8-15.
CHEN Ling, HUANG Xinghua, ZHANG Gonglin, et al. Distri-

- buted generations clusters collaborative control method considering peak load shifting[J]. Smart Power,2023,51(4):8-15.
- [10] 胡雪凯,尹瑞,时珉,等. 基于改进粒子群算法的分布式光伏集群划分与无功优化策略[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(4):14-21.
HU Xuekai, YIN Rui, SHI Min, et al. Distributed photovoltaic cluster partition and reactive power optimization strategy based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 14-21.
- [11] AL FAIYA B, MCARTHUR S, KOCKAR I. Partitioning and self-organization of distributed generation in large distribution networks[C]//2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Washington, DC, USA. IEEE, 2021:1-5.
- [12] CAI Y, ZENG S Q, TAN X L. PV cluster partition based coordinated voltage control for active distribution network with high penetrated PVs[C]//The 2nd International Conference on Electronic Materials and Information Engineering. Hangzhou, China. VDE, 2022:1-5.
- [13] 阎怀东,蔡立华,沙骏,等. 高比例新能源接入的配电网集群划分及电压控制[J]. 电力需求侧管理,2021,23(4):8-13.
YAN Huaidong, CAI Lihua, SHA Jun, et al. Distribution network cluster division and voltage control with high proportion of new energy access[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(4): 8-13.
- [14] 丁明,张宇,毕锐,等. 考虑集群划分的配电网网源协调扩展规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(1):136-143.
DING Ming, ZHANG Yu, BI Rui, et al. Coordinated grid-power source expansion planning for distribution network considering cluster partition[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1): 136-143.
- [15] 丁明,刘先放,毕锐,等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(15):47-52,141.
DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 47-52, 141.
- [16] 李翠萍,东哲民,李军徽,等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(23):76-83.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accomodation in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 76-83.
- [17] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [18] 李静轩,周明,朱凌志,等. 可再生能源电力系统运行灵活性需求量化及优化调度方法[J]. 电网技术,2021,45(7):2647-2655.
LI Jingxuan, ZHOU Ming, ZHU Lingzhi, et al. Flexibility requirement quantifying and optimal dispatching for renewable integrated power systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2647-2655.
- [19] YAO G, ZHANG Y Q, ZHANG T, et al. Adaptive grid partitioning considering power supply and load distribution[J]. IEEE Access, 2022, 10: 111066-111076.
- [20] 赵福林,俞啸玲,杜诗嘉,等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):42-51.
ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 42-51.
- [21] HADI M B, MOEINI-AGHTAIE M, KHOSHJAHAN M, et al. A comprehensive review on power system flexibility: concept, services, and products[J]. IEEE Access, 2022, 10: 99257-99267.
- [22] 臧延雪,边晓燕,梁思琪,等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(11):15-26.
ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 15-26.
- [23] 童宇轩,胡俊杰,刘雪涛,等. 新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化,2023,47(15):80-90.
TONG Yuxuan, HU Junjie, LIU Xuetao, et al. Quantification of flexibility supply and demand and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy dominated power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 80-90.
- [24] 单文亮,刘静,徐宪东,等. 基于可调鲁棒优化的工业园区供能系统自发电灵活性评估[J]. 高电压技术,2023,49(4):1402-1411.
SHAN Wenliang, LIU Jing, XU Xiandong, et al. Evaluation of the electricity flexibility of energy supply system in industrial park using adjustable robust optimization framework[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1402-1411.
- [25] 丁明,高平平,毕锐,等. 考虑灵活性高渗透率可再生能源集群划分方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(1):115-122,150.
DING Ming, GAO Pingping, BI Rui, et al. Cluster partition method for high-permeability renewable energy considering flexibility[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1): 115-122, 150.
- [26] WANG Y H, LIU Z W, JIANG J M, et al. Distributed genera-

- tion cluster partition method considering the flexible inertia supporting capability [C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Hefei, China. IEEE, 2023;1725-1730.
- [27] 叶畅,伊华茂,朱炯达,等. 考虑灵活性供需平衡及响应速度的分布式电源集群划分方法[J]. 中国电力,2023,56(2):150-156.
YE Chang, YI Huamao, ZHU Jiongda, et al. A cluster partition method for distributed generation considering flexibility supply-demand balance and response speed [J]. Electric Power, 2023, 56(2):150-156.
- [28] 魏震波,关翔友,刘梁豪. 电网社区结构发现方法及其应用综述[J]. 电网技术,2020,44(7):2600-2609.
WEI Zhenbo, GUAN Xiangyou, LIU Lianghao. Overview of power community structure discovery algorithms and their application in power grid analysis [J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2600-2609.
- [29] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):9-19.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):9-19.
- [30] MOHANDÉS 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.
- [31] 荣雅君,冯海潮,宋立伟,等. 基于自适应遗传算法含光伏电源的配电网无功优化[J]. 电器与能效管理技术,2020(11):85-91.
RONG Yajun, FENG Haichao, SONG Liwei, et al. Reactive power optimization of distribution network with photovoltaic power supply based on adaptive genetic algorithm [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(11):85-91.
- [32] CHEN H Y, CHEN S M, LI M, et al. Optimal operation of integrated energy system based on exergy analysis and adaptive genetic algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8:158752-158764.

作者简介:



吕文琪

吕文琪(1999),女,硕士在读,研究方向为分布式电源并网运行与控制技术(E-mail: lwq2022@hhu.edu.cn);

刘子文(1991),男,博士,副教授,研究方向为新能源并网主动支撑技术;

董晓霄(1990),女,博士,副教授,研究方向为新能源装备与控制、电动汽车。

A cluster partitioning method considering adjustable capacity and response speed of flexible resources

LYU Wenqi, LIU Ziwen, DONG Xiaoxiao, ZHU Junpeng, YUAN Yue

(School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to improve the orderly control and flexible adjustment capabilities of large-scale distributed power sources connected to the distribution network, it is currently an effective method to reasonably divide the distributed power sources into clusters and use the cluster as the basic unit for regulation. To this end, a distributed power cluster partitioning method that considers the adjustable capacity and response speed of flexible resources is proposed. Firstly, the modularity index and the active power balance index are proposed to characterize the structural and power balance capability of clusters. Secondly, based on the analysis of the cluster's flexible response capability, and in view of the problem that it is difficult to quantify the impact of the flexible resource response capacity and response speed on the adjustment capability, it is proposed to take the cumulative area of deviation between the response curve of cluster output and the net load curve as the indicator of the flexible response capability of clusters, and the influence of the allocation of energy storage capacity on the delineation of clusters is also taken into account. Then, a cluster division objective function that comprehensively considers the modularity index, active power balance index, cluster flexible response capability index and energy storage unit allocation index is proposed, and this function is solved using an improved adaptive genetic algorithm. Finally, the proposed method is verified in the improved IEEE 33-node system and IEEE 69-node system. The results show that the cluster partitioning method based on the proposed comprehensive performance index can improve the cluster flexible response capability by more than 20% on the basis of ensuring the structural strength of the cluster, which verifies the effectiveness and superiority of the cluster partitioning method proposed in this paper.

Keywords: distributed generation; cluster flexibility; power balance; adjustable capacity; response speed; cluster partition

(编辑 李栋)