第48卷 第3期 2024年2月10日
DOI：10.7500/AEPS20230728003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 48 No. 3 Feb. 10，2024

灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系

王思远[1,2]，吴文传[1,2]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084；
2. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室，清华大学，北京市 100084）

摘要：高比例新能源并网给电网带来了显著的波动性和不确定性，使受端电网面临可调节资源能力不足的问题，需要充分利用大量的灵活性资源参与电网调度并提供辅助服务。然而，灵活性资源的数量众多、分布广泛且特性各异，给资源的集中调控带来了新的挑战，需要以集群的形式对灵活性资源进行管理和调度。为了更加准确地评估集群在电网调控中的作用，需要将灵活性资源进行聚合，并根据应用需求采用适当的量化指标衡量其性能。基于灵活性资源集群在电网调度和电力市场中的应用需求，提出了评估灵活性资源集群可调节能力的量化指标体系。根据物理特性，将其分为类发电机特性、类储能特性和共有特性3类。为了实现不同应用场景下对集群灵活性指标的量化评估，构建了由等效发电机和等效储能所组成的灵活性资源集群的聚合参考模型。此聚合参考模型具有直观的物理意义和良好的多重嵌套特性，并适用于多种时间尺度和多种能量形式，可以被用于计算特定应用场景下的量化性能指标，以及应用于分布式资源集群的异步调度、综合能源系统的联合优化调度、虚拟电厂参与电力市场的投标报价等多个场景中。

关键词：灵活性资源；聚合参考模型；量化指标体系；高维多面体投影；电力系统

0 引言

随着中国“碳达峰·碳中和”战略目标的提出，新能源渗透率迅速提升，引起电网运行的随机性和波动性日趋严重。与此同时，随着“西电东送”工程的推进，东部电网的区外来电比例逐步提升。传统电网调度和控制中，新能源跟网运行，不参与主动控制，而直流输电线以定计划的方式运行，这导致受端电网可调节资源能力严重不足，面临空心化问题。因此，需要利用好分散在电网各处的大量分布式资源参与电网调度与控制，为电网提供调峰、调频和调压容量，确保电网的安全平稳运行。

灵活性资源包括分布式电源、分布式储能和可控负荷等多种分散分布在电网中的资源。近年来，通信和控制技术的迅速发展给优化调控大规模灵活性资源提供了良好基础。灵活性资源分布广泛，规模较小，具备快速响应能力，可在用电高峰时调整电力消耗或向电网供电，进而降低电网峰值负荷，减少电网和电源的冗余投资。此外，大规模灵活性资源还可以为电网提供调压、调频、调峰和备用等多种辅助服务。

海量的灵活性资源需要按照变电站供电范围自然划定的区域以集群的形式进行管理，集群中各种类型的资源具有不同特性。为了更加准确地表征集群的灵活性，需要构建一套量化指标体系对集群整体的灵活性进行量化评估，实现对灵活性资源的聚合[1-2]。

现有的研究定义了灵活性资源的特征指标，并研究了集群的聚合评估方法。文献[3]解释了“灵活性”的概念，提出了一种用于对灵活性资源的特征进行分类的方法，将特征分为定量指标、定性指标、可控性指标和成本指标几类；文献[4-5]分别将灵活性的指标定义为爬坡能力不足的期望和概率；文献[6]将灵活性表示为在特定时间段内灵活性供应相对于需求充足的概率；文献[7]将灵活性资源集群聚合为一种特殊发电机的形式；文献[8]提出了包含容量、爬坡、时间和成本等多个因素的节点运行包络模型。为了保证基于聚合结果进行优化后的控制策略具有可行性，文献[9-10]针对灵活性可行域的范围用高维立方体和高维椭球体进行内接近似；文献[11]构建了灵活性资源统一储能形式的数学模型，

收稿日期：2023-07-28；修回日期：2023-09-12。
上网日期：2023-12-20。
国家重点研发计划资助项目（极高渗透率分布式光伏发电自适应并网与主动同步关键技术，2022YFB2402900）；国家自然科学基金资助项目（U2066601）。

并计算了高精度的集群灵活性外接模型；文献[12]构建了包括调节方向、调节幅度、响应时间、持续时间和爬坡速率等指标所构成的响应能力评价指标体系。部分灵活性资源受到天气和社会系统的影响，其灵活性参数具有一定的随机性，可以采用区间理论或概率分布函数进行求解计算。文献[13-14]提出了相对距离测度区间理论，实现了在考虑不确定性条件下的区间网络优化。此外，文献[15]采用混合高斯模型拟合随机变量的联合概率分布函数，并用机会约束方法将含有随机变量的约束条件转化为一定置信度下的确定性约束条件，从而在给定置信度下实现灵活性评估。

在现有的研究中，往往针对不同的应用需求而采用不同的灵活性指标，缺乏一种系统性的、能够考虑大规模灵活性资源可调节范围的系统建模方法和量化指标体系。因此，需要针对灵活性资源集群的聚合问题构建一个物理意义更加明确的聚合参考模型，从而能够在特定的应用场景下快速计算得到相应的灵活性量化指标。

本文从灵活性资源集群参与调度和辅助服务市场的需求出发，整理了灵活性量化指标体系，并归结为类发电机特性、类储能特性和共有特性3种类型。随后，构建了由等效发电机和等效储能设备组成的灵活性资源聚合参考模型，并提供了参考模型的参数求解方法。所提出的聚合参考模型具有直观的物理意义和多重嵌套特性，可适用于多种时间尺度和多种能量形式，为电网的调控和辅助服务应用提供基础。所提出的聚合参考模型保证了解聚合的可行性，并且获得了尽可能大的灵活性资源功率可调节范围，使得多种类型资源聚合后的灵活性得到准确评估和充分利用，进而能够在不同的辅助服务场景下方便地计算出相应的灵活性量化指标。

1　灵活性资源集群的量化指标

量化灵活性资源集群的整体特征是评估其可调节能力的重要前提。在国内外典型的辅助服务市场中[16-17]，针对提供辅助服务的市场主体均提出了性能指标。因此，为了构建适当的量化特征指标体系，需要根据不同灵活性应用场景下的性能需求选择合适的指标。

1）调峰与备用。在灵活性资源参与电网调峰或备用辅助服务时，调控中心需要确认参与调度设备的功率可调节范围，基于其功率容量、爬坡速率和能量容量进行调度决策。其中，功率容量反映了灵活性资源可调节功率的上、下限；爬坡速率则反映了灵活性资源的调节速度。在美国PJM（Pennsylvania-New Jersey-Maryland）辅助服务市场中，备用辅助服务的性能通过规定时间内的备用响应水平来衡量[18]。能量是功率对时间的积分，能量容量反映了灵活性资源在一定时间内净输出/输入能量的调节能力。对于储能类型的设备，其储能容量有一定限制；对于发电机类型的设备而言，其在能量容量方面无约束。

2）调频。在《华北区域并网发电厂“两个细则”（2019年修订版）》文件[19]中，以15 s、30 s出力响应指数和电量贡献指数3个指标来考核机组的一次调频性能。美国PJM辅助服务市场用调频响应时延、调频曲线相关性和调频精度3个指标衡量调频辅助服务的性能[20]。在上述辅助服务市场的性能指标中，为了保证调频和备用的响应速度以及对于指令信号的跟随精度，对参与主体的响应时间和爬坡能力提出了要求。另外，灵活性资源的下垂系数、惯量和响应时间也是衡量一次调频性能的重要动态指标。

3）调压。灵活性资源的动态调压性能可以通过无功可调节容量、下垂系数和响应时间进行衡量。

4）调控成本。根据灵活性资源的不同类型，调控成本可分为调节成本、燃料成本、弃电成本和维护成本等类型。其中，调节成本主要由可控负荷和储能设备等资源产生；燃料成本主要指小容量发电机在发电过程中消耗的燃料费用；弃电成本则是由光伏和风电机组等新能源设备因未能满出力运行而造成的损失；维护成本包括灵活性资源设备的维修保养费用以及储能电池模块的更换成本等。

为了使分布式资源具备参与电网调度和电力市场的资格，需要将小容量的灵活性资源聚合成一个集群。一个集群内的灵活性资源以整体的形式参与调度和电力市场。如图1所示，根据灵活性资源集群在参与电网调度和辅助服务市场中的应用需求，可将各类型场景下的性能指标归结为3类：类发电机特性、类储能特性和共有特性。其中，涉及的灵活性资源动态特性指标包括下垂系数、惯量和响应时间等指标，上述动态特性指标的等效聚合方法在文献[21-22]中进行了介绍。本文主要介绍在不同的灵活性应用场景中涉及的稳态功率可调范围指标，包括功率容量、爬坡速率和能量容量3类。为了表示灵活性资源集群整体的稳态功率可调节范围，可以根据物理特性，将集群中的灵活性资源分类聚合为等效发电机和等效储能。其中，等效发电机模型的可调节范围由集群的功率容量和爬坡速率等指标来描述；等效储能模型的可调节范围由功率容量、爬坡速率和能量容量等指标来描述。

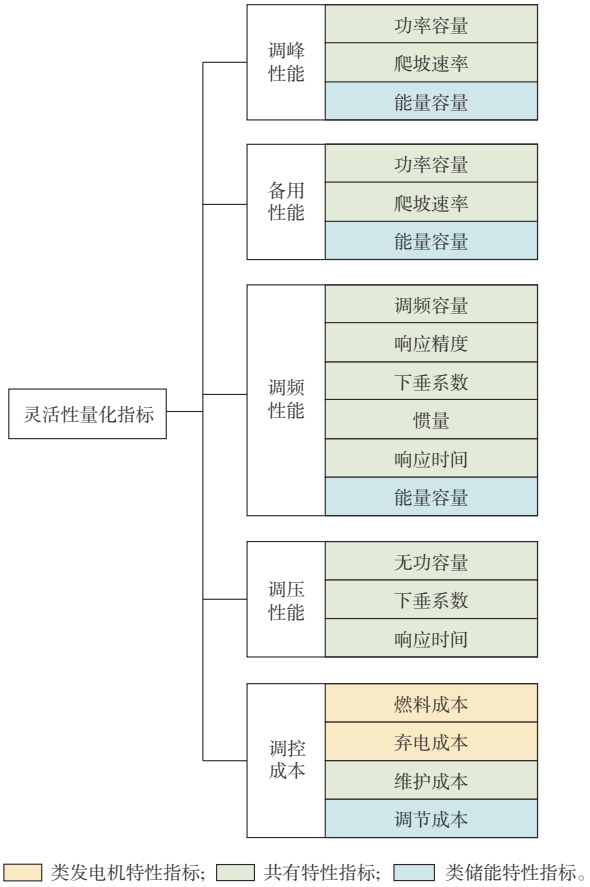

图1　灵活性量化指标
Fig. 1　Quantitative metric of flexibility

2　灵活性资源聚合参考模型的构建

2.1　灵活性资源聚合的数学模型

所谓灵活性资源聚合，就是在考虑资源集群网络约束和设备约束的前提下，将集群内的各设备在各时刻的功率可调节范围映射至集群与上级电网的并网点处，从而用并网点处各时刻的功率可调节范围来代表集群中所有灵活性资源设备的功率可调节范围。

灵活性资源的聚合需要考虑网络约束条件和每个灵活性资源设备的约束条件，例如，发电机的功率约束条件和爬坡约束条件、储能的功率约束条件和能量约束条件、暖通空调设备的舒适温度约束等。其中，网络约束条件描述的是单个时间断面下各个灵活性资源设备之间的约束条件，具有空间耦合特性；设备约束条件描述的是单个设备在各个时间点之间的约束条件，具有时间耦合特性。各设备各时刻决策变量之间的空间耦合条件与时间耦合条件相互交织，构成了规模庞大的时空耦合约束方程。

基于线性潮流模型，各决策变量之间的线性运行约束条件可以记作如下紧凑的矩阵约束形式：

$$\boldsymbol{Ex} \leqslant \boldsymbol{f} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{x}$为由集群内各个灵活性资源设备在各时刻的有功和无功功率所构成的决策变量向量；$\boldsymbol{E}$和$\boldsymbol{f}$分别为构成线性不等式约束参数的常数矩阵和向量。

构成约束条件(1)的约束包括集群中网络节点电压和支路潮流约束以及灵活性资源设备的功率上限和下限约束、爬坡约束和能量约束等。基于线性潮流模型构建功率平衡方程，各时刻并网点处的有功功率$\boldsymbol{p}_0$可以由决策变量向量$\boldsymbol{x}$用线性运算方式表示，记作：

$$\boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{d} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{C}$和$\boldsymbol{d}$分别为构成线性等式约束参数的常数矩阵和向量。

结合式(1)和式(2)的约束条件，可以得到灵活性资源集群整体的技术性约束范围为：

$$\boldsymbol{P}_1 = \left\{ [\,\boldsymbol{x} \quad \boldsymbol{p}_0\,]^{\mathrm{T}} \middle| \boldsymbol{Ex} \leqslant \boldsymbol{f};\ \boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{d} \right\} \qquad \boldsymbol{P}_1 \subset \boldsymbol{F}_1 \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{P}_1$为灵活性资源集群的有功功率可调节范围，由线性等式和不等式约束条件共同构成，从几何意义来看，$\boldsymbol{P}_1$体现为一个高维多面体的形式；$\boldsymbol{F}_1$为$\boldsymbol{P}_1$所在的高维空间，由$\boldsymbol{x}$和$\boldsymbol{p}_0$共同张成。

灵活性资源集群聚合后的可调节范围$\boldsymbol{P}_2$可以用并网点处各时刻的功率约束条件表示，其所在空间$\boldsymbol{F}_2$仅由向量$\boldsymbol{p}_0$张成，表示为：

$$\boldsymbol{P}_2 = \left\{ \boldsymbol{p}_0 \middle| \boldsymbol{Ap}_0 \leqslant \boldsymbol{b} \right\} \qquad \boldsymbol{P}_2 \subset \boldsymbol{F}_2 \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{A}$和$\boldsymbol{b}$分别为高维多面体$\boldsymbol{P}_2$的参数矩阵和向量。

从几何意义来看，$\boldsymbol{P}_2$可以表示为一个较低维空间$\boldsymbol{F}_2$中的多面体，如图2所示。因此，由$\boldsymbol{P}_1$计算$\boldsymbol{P}_2$的过程可以视为高维空间$\boldsymbol{F}_1$中的$\boldsymbol{P}_1$向较低维的空间$\boldsymbol{F}_2$进行降维投影得到$\boldsymbol{P}_2$的过程。通过投影运算，决策变量$\boldsymbol{x}$所在的维度被消去，而并网点处的有功功率$\boldsymbol{p}_0$所在的维度被保留。但是，从纯数学问题的角度来看，计算高维多面体向低维空间投影后得到的多面体参数是一个具有多项式复杂程度的非确定性(non-deterministic polynomial，NP)问题。而在本问题中，$\boldsymbol{P}_1$的维数可能高达成千上万维，几乎不可能详细计算投影后多面体$\boldsymbol{P}_2$中的参数$\boldsymbol{A}$和$\boldsymbol{b}$的精确解。因此，在实际应用中，需要结合物理意义选取适当的参数来构造一个多面体$\hat{\boldsymbol{P}}_2$近似真实的投影多面体$\boldsymbol{P}_2$。

为了保证灵活性资源集群解聚合的可行性，还应该确保$\hat{\boldsymbol{P}}_2 \subseteq \boldsymbol{P}_2$，即近似的多面体$\hat{\boldsymbol{P}}_2$应该被原始的多面体$\boldsymbol{P}_2$包含。这是因为，对于一个并网点处的有功功率调度指令$\boldsymbol{p}_0^*$，只有满足$\boldsymbol{p}_0^* \in \boldsymbol{P}_2$时，才能在$\boldsymbol{P}_1$

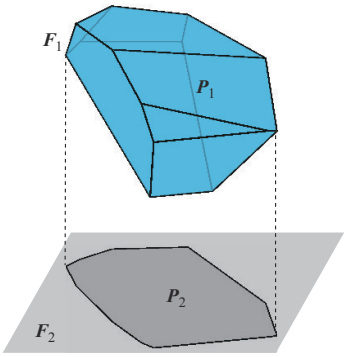

图2　高维多面体投影示意图

Fig. 2　Schematic diagram for projection of high-dimensional polyhedron

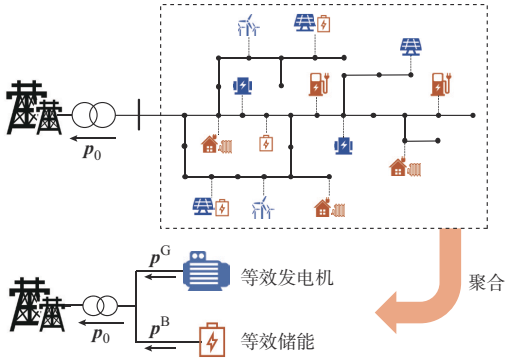

图3　灵活性资源聚合的等效发电机和等效储能模型

Fig. 3　Equivalent generator and equivalent energy storage models for aggregation of flexible energy resources

中找到与之对应的决策变量$\boldsymbol{x}$的可行解，从而实现对调度指令的解聚合。为了减小近似误差，$\hat{\boldsymbol{P}}_2$的体积还应该尽可能地大。

2.2　基于物理意义的灵活性资源分类

灵活性资源的聚合是将多个设备的功率调节特性聚合为一个实体的调节特性。对于多个具有爬坡约束条件的灵活性资源，聚合后仍然体现为具有爬坡约束的性质；对于多个具有能量约束条件的灵活性资源，聚合后仍然体现为具有能量约束的性质。因此，根据灵活性资源的上述特性，可以将种类繁多的灵活性资源按照性质进行分类聚合。对于输入和输出能量无约束、对功率输出的时间持续性无限制的灵活性资源，可以将其分类为类发电机灵活性资源；对于输入和输出能量均有约束、对功率输出的时间持续性有限制的灵活性资源，可以将其分类为类储能灵活性资源。按照上述分类标准，常见的灵活性资源设备可以分为如下2类：

1)类发电机灵活性资源，包括微型发电机、燃料电池、光伏设备、风力发电机、可削减负荷、不可调负荷等。

2)类储能灵活性资源，包括储能系统、电动汽车、暖通空调、气网、热网、可转移负荷等。

2.3　灵活性资源聚合参考模型的参数计算方法

基于物理意义，在计算灵活性资源聚合模型时，可以先将集群中的灵活性资源进行分类，并分别聚合为等效发电机和等效储能2个设备，如图3所示。图中：$\boldsymbol{p}^{\mathrm{G}}$和$\boldsymbol{p}^{\mathrm{B}}$分别为各时刻并网点处的等效发电机、等效储能有功功率。2个等效设备的功率可调节范围分别表示如下：

$$\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}}=\left\{\boldsymbol{p}^{\mathrm{G}}\middle|\underline{r}_t^{\mathrm{G}}\leqslant p_t^{\mathrm{G}}-p_{t-1}^{\mathrm{G}}\leqslant\overline{r}_t^{\mathrm{G}},\ \underline{p}_t^{\mathrm{G}}\leqslant p_t^{\mathrm{G}}\leqslant\overline{p}_t^{\mathrm{G}},\forall t\in T\right\}\tag{5}$$

$$\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{B}}=\left\{\boldsymbol{p}^{\mathrm{B}}\middle|\underline{r}_t^{\mathrm{B}}\leqslant p_t^{\mathrm{B}}-p_{t-1}^{\mathrm{B}}\leqslant\overline{r}_t^{\mathrm{B}},\ \underline{e}_t^{\mathrm{B}}\leqslant\sum_{\tau=0}^{t}p_\tau^{\mathrm{B}}\Delta t\leqslant\overline{e}_t^{\mathrm{B}},\ \underline{p}_t^{\mathrm{B}}\leqslant p_t^{\mathrm{B}}\leqslant\overline{p}_t^{\mathrm{B}},\forall t\in T\right\}\tag{6}$$

式中：T为由全体时间点构成的集合；$\overline{p}_t^{\mathrm{G}}$和$\underline{p}_t^{\mathrm{G}}$、$\overline{r}_t^{\mathrm{G}}$和$\underline{r}_t^{\mathrm{G}}$分别为描述等效发电机设备的功率可调节范围在各时刻的功率上限和下限、爬坡约束的上限和下限；$\overline{p}_t^{\mathrm{B}}$和$\underline{p}_t^{\mathrm{B}}$、$\overline{r}_t^{\mathrm{B}}$和$\underline{r}_t^{\mathrm{B}}$、$\overline{e}_t^{\mathrm{B}}$和$\underline{e}_t^{\mathrm{B}}$分别为描述等效储能设备的功率可调节范围在各时刻的功率上限和下限、爬坡约束的上限和下限、能量约束的上限和下限；p_t^{G}和p_t^{B}分别为等效发电机设备和等效储能设备在时刻t的功率。

在整合等效发电机和等效储能后，灵活性资源集群的聚合模型可表示为$\hat{\boldsymbol{P}}_2=\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}}\oplus\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{B}}$。其中，符号$\oplus$表示Minkowski和，用于表示集合间的运算，其数学形式如下：

$$\hat{\boldsymbol{P}}_2=\left\{\boldsymbol{p}_0\middle|\boldsymbol{p}_0=\boldsymbol{p}^{\mathrm{G}}+\boldsymbol{p}^{\mathrm{B}},\boldsymbol{p}^{\mathrm{G}}\in\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}},\boldsymbol{p}^{\mathrm{B}}\in\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{B}}\right\}\tag{7}$$

灵活性资源集群中的设备可以分为类发电机设备和类储能设备2类设备，并分别聚合为等效发电机和等效储能。然而，由于2种类型设备之间通过网络约束条件相互耦合，导致一类设备的状态发生变化时，另一类设备的可调节范围会发生变化，影响了2类等效模型的计算结果。因此，需要利用鲁棒优化方法，将2种类型设备间网络耦合约束条件进行拆分，再分别计算出等效发电机和等效储能2个等效设备的参数，便能够保证$\hat{\boldsymbol{P}}_2\subseteq\boldsymbol{P}_2$成立。下面以等效发电机设备为例，介绍等效设备参数的计算过程。

基于灵活性资源聚合的数学含义可知，灵活性资源集群中的类发电机设备聚合为等效发电机的过

程，可视为所有发电机类设备的功率可调节范围$\boldsymbol{P}_1^{\mathrm{G}}$向并网点处等效发电机设备有功功率$\boldsymbol{p}^{\mathrm{G}}$可调节范围$\boldsymbol{P}_2^{\mathrm{G}}$的投影。由于无法计算$\boldsymbol{P}_2^{\mathrm{G}}$的精确结果，需要对其进行近似。为了保证灵活性资源集群解聚合的可行性，需要计算其内接的多面体$\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}}$的参数。现有的计算方法主要包括内接高维立方体[9]、内切高维椭球[10]、傅里叶消去法[23]、顶点搜索法[24]等。本文介绍高维多面体投影及边界收缩算法[25]的计算原理，其示意图如图4所示，主要流程如下。

首先，基于物理意义，类发电机设备的聚合结果仍然具有发电机的性质，据此可以给定式(5)所示的等效发电机的数学形式，相当于给定了目标结果多面体的规范化形状模板。由于投影多面体$\boldsymbol{P}_2^{\mathrm{G}}$的外接多面体参数可以非常方便地通过直接求解优化问题找到对应的极点快速得到，可以先计算出投影多面体$\boldsymbol{P}_2^{\mathrm{G}}$的外接多面体，该外接多面体的形状符合上述规范化形状模板，记作$\bar{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}}$。

随后，基于高维多面体投影及边界收缩算法，在保持外接多面体各个面斜率不变的情况下，各个面向内部进行收缩，直至所有顶点完全收缩至投影多面体$\boldsymbol{P}_2^{\mathrm{G}}$的内部或边界上，成为$\boldsymbol{P}_2^{\mathrm{G}}$的内接多面体，记作$\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}}$。这一收缩过程对应于等效发电机4组参数$\bar{p}_t^{\mathrm{G}}$、$\underline{p}_t^{\mathrm{G}}$、$\bar{r}_t^{\mathrm{G}}$、$\underline{r}_t^{\mathrm{G}}$的变化。在收缩完成后，$\hat{\boldsymbol{P}}_2^{\mathrm{G}}$所对应的参数即为等效发电机所对应的参数。

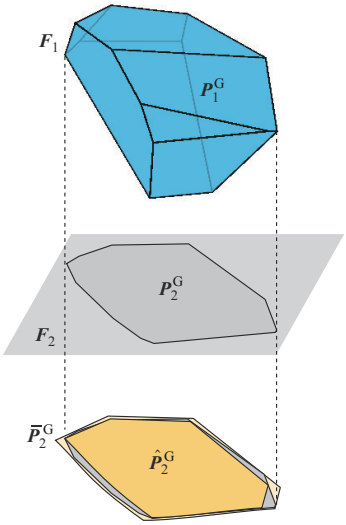

图4　计算等效发电机设备参数的算法示意图
Fig. 4　Schematic diagram of algorithm for calculating parameters of equivalent generator device

与上述过程类似，可以选取式(6)所示的储能模板，利用高维多面体投影及边界收缩算法，计算出等效储能的6组参数$\bar{p}_t^{\mathrm{B}}$、$\underline{p}_t^{\mathrm{B}}$、$\bar{r}_t^{\mathrm{B}}$、$\underline{r}_t^{\mathrm{B}}$、$\bar{e}_t^{\mathrm{B}}$、$\underline{e}_t^{\mathrm{B}}$。算法的具体细节可以参阅文献[25]。

另外，需要说明的是，在综合能源系统中，气网与热网具有良好的储能禀赋，从电网的角度来看，气网与热网均可被视为等效储能设备，从而通过气电转换设备(例如燃气轮机、电转气设备)或热电转换设备(例如电热锅炉、热电联产机组)为电网提供调峰的灵活性。因此，气网和热网所具有的灵活性也可以被等效为一个类似于式(6)的储能模型。

上述提出的聚合参考模型具有以下优点：

1)具有直观的物理意义。等效发电机可用于代表功率和爬坡有约束、能量无约束以及对功率输出的时间持续性无限制的设备；等效储能可用于代表功率、爬坡和能量均有约束以及对功率输出的时间持续性有限制的设备。这使得数量众多、特性各异的灵活性资源集群具有十分直观的指标体系参数，可为上级电网所需要的不同辅助服务需求提供有效参考。

2)具有良好的多重嵌套特性。基于上述聚合参考模型所得到的等效发电机和等效储能，仍然可以用同样的方法进一步参与更高一级的电网聚合，这使得电网可以“从下而上”逐级进行聚合，进而简化更高一层级的电网调度。

3)适用于多种时间尺度。聚合参考模型中的时间颗粒度可以根据调度需求进行自主选择。因此，无论是分钟级的调度，还是秒级的控制，都能够作为可调控范围的指标进行应用。这使得聚合参考模型能够适应多种时间尺度的调控需求。

4)适用于多种能量形式。上述聚合参考模型既可以聚合电网中分布式资源集群的灵活性，也可以将热网与气网所具有的储能能力量化为电网侧等效储能的灵活性，实现多种能量形式的灵活性统一评估。

3　灵活性资源聚合参考模型的应用

3.1　计算特定应用场景下的量化性能指标

在计算出灵活性资源集群聚合参考模型的参数后，即可根据不同的应用场景，将等效发电机和等效储能的参数转化为相应场景下的量化性能指标。

以灵活性资源参与调峰辅助服务的场景为例，为了评估集群参与调峰的功率容量量化指标，可以合并等效发电机和等效储能2个设备的功率可调节范围，从而形成集群各时刻功率可调节范围。另外，由于等效发电机没有能量容量的限制，而等效储能有能量容量的限制，在评估集群调峰的能量容量量化指标时，可以认为等效发电机的部分可以随时在功率可调范围内进行调节，而等效储能的部分还需要同时保证其功率对时间的积分维持在能量的上、

下限之间。合并2个等效设备的累计能量上、下限约束参数，即可计算出集群在各时刻累计输入能量的上限和下限性能指标。

3.2 分布式资源集群的异步调度

利用灵活性资源聚合参考模型，可以通过分层级的形式实现海量分布式资源的异步调度。传统针对灵活性资源的调度架构通常包括集中式或者分布式2类。在集中式的调度架构中，需要将所有设备各时刻的功率均作为控制变量，并由调控中心进行统一优化调度。这将导致优化问题的规模过于庞大，求解时间过长。因此，难以进行海量分布式灵活性资源的统一调度。另外，现有的分布式计算方法是将优化调度问题拆分为一个主问题和多个子问题的形式，通过反复的同步迭代，交换各优化问题之间的边界变量，最终收敛至最优值。但是，分布式方法存在收敛速度慢甚至可能完全不收敛的问题，而且在算法迭代的过程中要求所有问题以同步的方式进行，对通信故障的容忍度较低，这给分布式方法的实际应用带来了较大的困难。

基于分布式资源集群的聚合模型，可以进行分布式资源集群的异步调度。如图5所示，首先，大量的分布式资源按照地理位置关系被编入各个集群。各个集群的聚合商计算出各集群的聚合模型，并上传至上级电网的调控中心。由于计算集群自身聚合模型时无须与其他集群中的设备进行交互，调控中心对于集群上传聚合模型没有同步性的要求，这一过程可以被异步完成。随后，在上级电网收集完成所有集群的聚合模型后，基于聚合模型进行优化调度，并向各个集群下发调度命令。最后，集群的聚合商在收到上级电网的调度命令后，将调度指令进行解聚合，通过求解集群内部的优化调度问题将调度指令分解给各分布式资源，形成各分布式资源的调度计划。

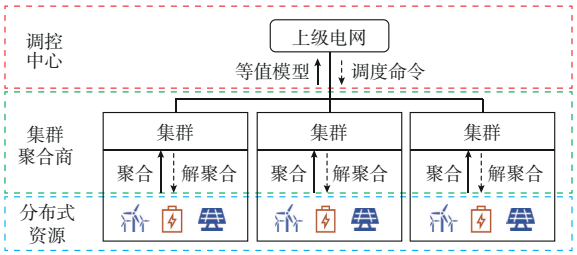

图5 基于等值模型的异步调度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of asynchronous dispatch based on equivalent model

调控中心对分布式资源集群的聚合调度问题可以用式(8)至式(14)表示。其中，目标函数为最小化运行成本，如式(8)所示；约束条件为灵活性资源集群、电网直控发电机、电网直控储能的技术约束条件和网络约束条件，如式(9)至式(14)所示。式(9)表示各灵活性资源集群聚合后的功率约束；式(10)和式(11)分别表示电网直控发电机的功率约束和爬坡约束；式(12)和式(13)分别表示电网直控储能设备的功率约束和能量约束；式(14)表示基于线性潮流模型的电网节点电压和支路容量约束。

$$\min \sum_t \left[\sum_i C^{\text{clus}}(p_{0,i,t}) + \sum_j C^{\text{gen}}(p_{j,t}^{\text{gen}}) + \sum_k C^{\text{ess}}(p_{k,t}^{\text{ess}}) \right] \tag{8}$$

s.t.

$$\boldsymbol{p}_{0,i} \in \hat{\boldsymbol{P}}_{2,i} \quad \forall i \tag{9}$$

$$\underline{p}_j^{\text{gen}} \leqslant p_{j,t}^{\text{gen}} \leqslant \bar{p}_j^{\text{gen}} \quad \forall j \tag{10}$$

$$\underline{r}_j^{\text{gen}} \leqslant p_{j,t+1}^{\text{gen}} - p_{j,t}^{\text{gen}} \leqslant \bar{r}_j^{\text{gen}} \quad \forall j \tag{11}$$

$$\underline{p}_k^{\text{ess}} \leqslant p_{k,t}^{\text{ess}} \leqslant \bar{p}_k^{\text{ess}} \quad \forall k \tag{12}$$

$$\underline{e}_k^{\text{ess}} \leqslant e_{k,0}^{\text{ess}} + \sum_{\tau=1}^{t} p_{k,\tau}^{\text{ess}} \Delta t \leqslant \bar{e}_k^{\text{ess}} \quad \forall k \tag{13}$$

$$\sum_i \boldsymbol{M}_i p_{0,i,t} + \sum_j \boldsymbol{M}_j p_{j,t}^{\text{gen}} + \sum_k \boldsymbol{M}_k p_{k,t}^{\text{ess}} \leqslant \boldsymbol{n} \tag{14}$$

式中：$C^{\text{clus}}(p_{0,i,t})$为灵活性资源集群$i$在时刻$t$输出有功功率$p_{0,i,t}$时的成本；$C^{\text{gen}}(p_{j,t}^{\text{gen}})$为电网直控发电机$j$在时刻$t$输出有功功率$p_{j,t}^{\text{gen}}$时的成本；$C^{\text{ess}}(p_{k,t}^{\text{ess}})$为电网直控储能$k$在时刻$t$的输出有功功率为$p_{k,t}^{\text{ess}}$时的成本；$\hat{\boldsymbol{P}}_{2,i}$为集群$i$的等效发电机和等效储能的可调节范围，如式(7)所示；$\underline{p}_j^{\text{gen}}$和$\bar{p}_j^{\text{gen}}$分别为电网直控发电机$j$输出有功功率下限、上限；$\underline{r}_j^{\text{gen}}$和$\bar{r}_j^{\text{gen}}$分别为电网直控发电机$j$爬坡功率下限、上限；$\underline{p}_k^{\text{ess}}$和$\bar{p}_k^{\text{ess}}$分别为电网直控储能$k$输出有功功率下限、上限；$e_{k,0}^{\text{ess}}$、$\underline{e}_k^{\text{ess}}$、$\bar{e}_k^{\text{ess}}$分别为电网直控储能$k$能量初值、下限、上限；$\boldsymbol{M}_i$、$\boldsymbol{M}_j$、$\boldsymbol{M}_k$分别为灵活性资源集群$i$、电网直控发电机$j$、电网直控储能$k$对节点电压和支路容量的灵敏度参数；$\boldsymbol{n}$为约束的常数项。

这一分层、分级的调度模式将集群中大量的灵活性资源设备功率约束条件聚合在约束式(9)中，有效解决了分布式资源设备数量庞大导致的计算复杂度过高的难题。另外，对于集群内部各个灵活性资源设备的详细数据信息起到了一定程度的隐私保护作用。本文在附录A中构建了相关算例，展示了将一个虚拟电厂内的灵活性资源聚合为一个等效发电机和一个等效储能的结果，以及多个虚拟电厂参与上级电网异步调度的结果。

3.3　综合能源系统的联合优化调度

在综合能源系统中，气网与电网通过燃气轮机、电转气设备实现天然气与电能的相互转化。从电网的角度来看，气电2种能量形式的转化过程可以分别类比于储能的放电过程和充电过程[26]。与此相类似，热网与电网之间通过电热锅炉、热电联产机组等设备实现电能向热能的转化以及电、热源之间的耦合。由于热负荷具有一定的热惯性，对于电网而言，热网可以同样承担储能的角色。

基于气网和热网的储能特性，可以将其投影到电功率的灵活性空间中，视为电力系统中的等效储能，从而打破不同能量形态之间的壁垒。等效储能的指标参数可以基于相同的原理，利用上述高维多面体投影及边界收缩算法进行计算。以气网为例，将气网转化为等效储能的示意图如图6所示。图中：$p_{1,t}^{\mathrm{GT}}$、$p_{2,t}^{\mathrm{GT}}$和$p_{3,t}^{\mathrm{P2G}}$分别表示燃气轮机1（GT1）、燃气轮机2（GT2）的发电功率和电转气设备3（P2G）的电解功率；$f_{1,t}^{\mathrm{GT}}$、$f_{2,t}^{\mathrm{GT}}$和$f_{3,t}^{\mathrm{P2G}}$分别表示燃气轮机1、燃气轮机2的消耗气流量和电转气设备3的生成气流量。气网的状态方程可以近似为线性方程[27]，气网中的气源压力、压缩机增压、燃气轮机和电转气设备的气流量可以被视为气网中的决策变量，各设备的技术约束条件和各气网节点的气压约束条件构成了气网的全部技术约束条件，可以整理为如式（1）所示的线性形式。气网向电网净输出的功率可以视为气网等效储能的净输出功率，并通过线性变换整理为式（2）进行表示。

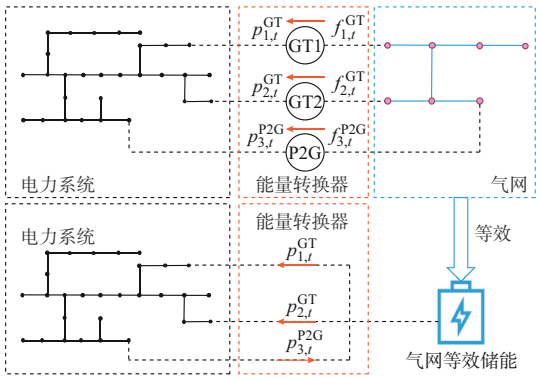

图6　将气网转化为等效储能的示意图

Fig. 6　Schematic diagram for depicting conversion of gas network into equivalent energy storage

需要说明的是，气网、热网与电网之间是通过多个能量转换器进行互联的。因此，除了计算等效储能的能量参数之外，还需要计算各个能量转换器之间的耦合约束条件。这些耦合约束条件由气网的网络约束条件隐式决定，形成了复杂的高维空间约束条件。为了能够得到显式的约束表达形式，可以使用1个内切的高维单象限椭球模型来简化各转换器设备之间的耦合约束关系[28]，例如，图6中3个能量转换器之间的约束关系可以表示为如图7所示的可调范围。内切椭球参数的计算方法可以参见文献[29]。

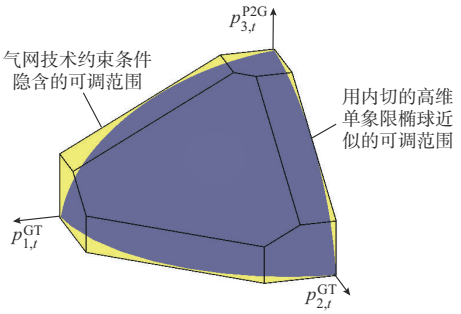

图7　用内切高维单象限椭球描述的能量转换器之间耦合关系的示意图

Fig. 7　Schematic diagram for depicting coupling relationship among energy converters with inscribed high-dimensional quadrant ellipsoids

3.4　虚拟电厂参与电力市场投标报价的参考

随着可再生能源的快速发展和电力市场改革的推进，虚拟电厂将在未来扮演越来越重要的角色。虚拟电厂通过整合多种分散的分布式能源资源，利用先进的数字技术和智能控制系统实现对电力系统的灵活调度和管理，响应电力市场的能量与辅助服务需求。

本文提供的灵活性资源聚合参考模型可以成为虚拟电厂运营商参与电力市场投标报价的有效参考。一方面，聚合参考模型中的等效发电机部分可以用于表示各时刻功率可调范围的上、下限约束，此部分表示了虚拟电厂中无时间持续性约束的那部分类发电机的灵活性资源。另一方面，聚合参考模型中的等效储能部分用于表示类储能灵活性资源的聚合特性，在功率输入和输出的时间持续性方面有一定的约束。因此，虚拟电厂运营商可以利用负荷峰值电价高、负荷谷值电价低的特点，结合电力市场的价格预测结果与内部灵活性资源的聚合调节成本，形成参与能量市场和辅助服务市场的投标报价策略，使得虚拟电厂内部的类储能灵活性资源在负荷峰值尽可能充电、在负荷谷值尽可能放电，最终实现虚拟电厂在电力市场中的赢利。

4　结语

本文构建了适应多种辅助服务需求的灵活性量化指标体系，建立了由等效发电机和等效储能所构成的灵活性资源聚合参考模型，给出了基于高维多

面体投影及边界收缩算法的聚合参考模型参数求解方法。在不同的应用场景中,聚合参考模型的参数可以转化为相应的可调节性能量化指标。另外,本文提出的聚合参考模型具有直观的物理意义和良好的多重嵌套特性,并且适用于多种时间尺度和多种能量形态。聚合参考模型还可以在分布式资源集群的异步调度、综合能源系统的联合优化调度和虚拟电厂参与能量市场和辅助服务市场的投标报价等多个场景发挥作用,未来将在实践中推广应用。

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

参 考 文 献

[1] CHICCO G, RIAZ S, MAZZA A, et al. Flexibility from distributed multienergy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1496-1517.

[2] 邱玥,陆帅,陆海,等.综合能源系统灵活性:基本内涵、数学模型与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(17):16-43.
QIU Yue, LU Shuai, LU Hai, et al. Flexibility of integrated energy system: basic connotation, mathematical model and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 16-43.

[3] DEGEFA M Z, SPERSTAD I B, SÆLE H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107022.

[4] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931.

[5] THATTE A A, XIE L. A metric and market construct of inter-temporal flexibility in time-coupled economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3437-3446.

[6] LU Z X, LI H B, QIAO Y. Probabilistic flexibility evaluation for power system planning considering its association with renewable power curtailment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3285-3295.

[7] ZHAO H T, CHEN J C, WANG B, et al. A robust aggregate model for multi-energy virtual power plant in grid dispatch[C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 21-23, 2019, Beijing, China: 1631-1636.

[8] RIAZ S, MANCARELLA P. Modelling and characterisation of flexibility from distributed energy resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 38-50.

[9] CHEN X, LI N. Leveraging two-stage adaptive robust optimization for power flexibility aggregation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3954-3965.

[10] CUI B, ZAMZAM A, BERNSTEIN A. Network-cognizant time-coupled aggregate flexibility of distribution systems under uncertainties[J]. IEEE Control Systems Letters, 2020, 5(5): 1723-1728.

[11] WEN Y L, HU Z C, YOU S, et al. Aggregate feasible region of DERs: exact formulation and approximate models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4405-4423.

[12] 蒋正威,张锋明,胡凤桐,等.虚拟电厂分布式资源的聚合响应能力评估方法[J].电力工程技术,2022,41(6):39-49.
JIANG Zhengwei, ZHANG Fengming, HU Fengtong, et al. Evaluation method of aggregated responsiveness of distributed resources in virtual power plant[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 39-49.

[13] NGO V, WU W C. Linear programming contractor for interval distribution state estimation using RDM arithmetic[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2114-2126.

[14] NGO V, WU W C. Interval distribution power flow with relative-distance-measure arithmetic[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3858-3867.

[15] WANG S Y, WU W C, CHEN Q Z, et al. Stochastic flexibility evaluation for virtual power plant by aggregating distributed energy resources[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems [2023-05-10]. https://dx.doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.07410.

[16] 何永秀,陈倩,费云志,等.国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J].电网技术,2018,42(9):2915-2922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2915-2922.

[17] 吴珊,边晓燕,张菁娴,等.面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J].电工技术学报,2023,38(6):1662-1677.
WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.

[18] PJM. PJM manual 11: energy & ancillary services market operations [EB/OL]. (2023-05-31) [2023-07-02]. https://www.pjm.com/directory/manuals/m11/index.html#table-of-exhibits.html.

[19] 国家能源局华北监管局.华北区域并网发电厂"两个细则"(2019年修订版)[EB/OL].(2019-09-30)[2023-07-05].http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do? pk=000000006c2a4364016d7de32f4d01f5.
The North China Regulatory Bureau of the National Energy Administration. "Two specific regulations" for interconnected power plants in the North China region (revised 2019)[EB/OL]. (2019-09-30) [2023-07-05]. http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do? pk=000000006c2a4364016d7de32f4d01f5.

[20] PJM. PJM manual 12: balancing operations[EB/OL]. [2023-06-22]. https://www.pjm.com/-/media/documents/manuals/m12.ashx.

[21] GUGGILAM S S, ZHAO C H, DALL'ANESE E, et al. Optimizing DER participation in inertial and primary-frequency response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5194-5205.

[22] FENG C, CHEN Q X, WANG Y, et al. Provision of contingency frequency services for virtual power plants with

aggregated models [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2798-2811.

[23] JAHROMI A A, BOUFFARD F. On the loadability sets of power systems—Part Ⅰ: characterization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 137-145.

[24] TAN Z F, ZHONG H W, WANG J X, et al. Enforcing intra-regional constraints in tie-line scheduling: a projection-based framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4751-4761.

[25] WANG S Y, WU W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.

[26] DAI W, YU J, YANG Z F, et al. A static equivalent model of natural gas network for electricity-gas co-optimization [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1473-1482.

[27] CHEN B B, WU W C, GUO Q L, et al. An efficient optimal energy flow model for integrated energy systems based on energy circuit modeling in the frequency domain [J]. Applied Energy, 2022, 326: 119923.

[28] WANG S Y, WU W C, LIN C H, et al. A dynamic equivalent energy storage model of natural gas networks for joint optimal dispatch of electricity-gas systems [J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Energy [2023-06-22]. https://ieeexplore.ieee.org/document/10261292.

[29] ZHEN J Z, DEN HERTOG D. Computing the maximum volume inscribed ellipsoid of a polytopic projection [J]. INFORMS Journal on Computing, 2018, 30(1): 31-42.

王思远(1997—),男,博士研究生,主要研究方向:分布式灵活性资源聚合与综合能源系统灵活性等值、物理信息引导的人工智能算法在系统参数辨识中的应用。E-mail: wangsy0424@foxmail.com

吴文传(1973—),男,通信作者,博士,教授,IEEE/CSEE Fellow,主要研究方向:能量管理系统、主动式配电网运行与控制、机器学习在能源系统中的应用。E-mail: wuwench@tsinghua.edu.cn

(编辑　顾晓荣)

Aggregation Reference Model and Quantitative Metric System of Flexible Energy Resources

WANG Siyuan[1,2], *WU Wenchuan*[1,2]

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The penetration of high-proportion renewable energy brings significant volatility and uncertainty to power grids. Thus the receiving end of the power system faces the problem of insufficient adjustable resource capacity. It requires the full utilization of a large number of flexible energy resources to participate in power system dispatch and provide auxiliary services. However, the vast number, wide distribution, and diverse characteristics of these flexible energy resources pose significant challenges to centralized dispatch and control. It is necessary to manage and dispatch these flexible energy resources in a clustered way. To accurately assess the role of clusters in the power system dispatch and control, it is essential to aggregate these flexible energy resources and evaluate their performance by using appropriate quantitative metrics based on application requirements. According to the application demands of flexible resource clusters in power system dispatch and electricity market, a quantitative metric system of flexibility for evaluating the adjustable capacity of flexible energy resource clusters is proposed. Based on their physical characteristics, these resources are categorized into three types: generator-like characteristics, storage-like characteristics, and common characteristics. For quantitative evaluation of the cluster flexibility metrics across various application scenarios, an aggregation reference model comprising an equivalent generator and an equivalent energy storage is proposed. This aggregation reference model has a clear physical interpretation, exhibits nested properties, and therefore is suitable for various time scales and energy forms. It can be used to calculate the quantitative metrics for specific application scenarios and widely applied in scenarios such as asynchronous dispatch of distributed energy resource clusters, joint optimization dispatch of integrated energy systems, and participation of virtual power plant in electricity market bidding.

This work is supported by National Key R&D Program of China (Key Techniques of Adaptive Grid Integration and Active Synchronization for Extremely High Distributed Photovoltaic Power Penetration Generation, No. 2022YFB2402900) and National Natural Science Foundation of China (No. U2066601).

Key words: flexible energy resource; aggregation reference model; quantitative metric system; high-dimensional polyhedron projection; power system