柔性负荷聚合灵活性的多时间颗粒度鲁棒评估方法

王光瑞^{1,2},李正烁^{1,2},刘聪聪^{1,2} (1. 山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061; 2. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061)

摘要:面向柔性负荷虚拟电厂(FLVPP),提出了包含日内滚动时间窗-调度周期-分钟级的多时间颗粒度的动态聚合灵活性的鲁棒评估方法。分析了多时间颗粒度评估的必要性,构造了最大化多个时段聚合灵活性的 鲁棒评估模型,考虑了多时段耦合、电力网络拥塞、负荷运行状态在调度周期内发生变化以及时延响应的影 响。该模型属于决策依赖的不确定性优化模型,可通过数学变换转化为常规两阶段鲁棒优化问题。针对第 二阶段问题存在的二进制变量,设计了基于嵌套列和约束生成算法的迭代求解策略。通过算例分析验证了 相比于现有常见方法,所提方法可以更加准确地评估FLVPP的聚合灵活性,同时验证了在评估聚合灵活性时 考虑电力网络约束的必要性,并展示了算法性能。

关键词:柔性负荷;虚拟电厂;鲁棒优化;多时间颗粒度;决策依赖不确定性;嵌套列和约束生成算法 中图分类号:TM73 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202211019

0 引言

当前,间歇性强的新能源在电力系统中的比重 不断增高,电力系统调节压力陡增,具有一定调节潜 力的需求侧柔性负荷对于新型电力系统的调度环节 愈发重要[1]。温控负荷、电动汽车、储能等柔性负荷 可以根据激励信号调节自身的用电行为,主动响应 电网调控需求[2]。然而柔性负荷个体容量较小、布 局分散,调度机构难以对其直接进行控制^[34]。有学 者提出可以采用柔性负荷虚拟电厂(flexible load virtual power plant, FLVPP)技术^[5]对柔性负荷进行 聚合和协调优化,向电网提供调频、调峰等服务,缓 解大规模可再生能源并网给电网安全运行带来的压 力^[67]。为顺利参与电网调度环节,FLVPP需要准确 评估和上报内部所有柔性负荷的功率调整范围,这 被称为"聚合灵活性"[8-9]。如何高效评估FLVPP的 聚合灵活性从而有效参与电网的多时段调度,是本 文的重点研究问题。

目前,评估FLVPP聚合灵活性的方法可粗略地

收稿日期:2022-06-29;修回日期:2022-09-22 在线出版日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007105);国家重 点研发计划项目(2019YFE0118400-1);国网山东省电力有限 公司科技项目(SGSDJY00NYJS2100050);新型电力系统运行 与控制全国重点实验室开放基金资助项目(SKLD22KZ08)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007105), the National Key Research and Development Program of China(2019YFE0118400-1), the Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company Limited (SGSDJY00NYJS2100050) and the Open Fund of State Key Laboratory of New Power System Operation and Control(SKLD22KZ08) 分为物理模型驱动和数据驱动2类^[10]。前者从柔性 负荷个体的物理模型角度出发构建柔性负荷的聚合 灵活性。例如:文献[11]使用内外逼近的方法将温 控负荷的聚合灵活性构建为"虚拟电池";文献[12] 从几何角度出发,通过平移和缩放的同伦变换近似 计算了异质温控负荷的聚合灵活性;文献[13]采用 鲁棒优化方法计算了FLVPP的聚合灵活性边界。 后者则不依赖物理模型,而是基于历史运行数据, 采用深度神经网络^[14]等工具计算FLVPP的聚合灵 活性。

FLVPP参与电网的多时段调度,需要评估 FLVPP在多个时段内的聚合灵活性(例如,滚动调 度,其时间窗口可达4h,若以15min为一个调度时 段,则一个窗口含有16个时段[15])。从几何角度出 发,如果将FLVPP在一个时段内的可调功率范围视 为一个维度,那么多时段聚合灵活性可由高维几何 体表征,如多面体模型和超椭球模型,因而评估 FLVPP多时段聚合灵活性就是求解高维几何体的最 大体积[16-17]。为准确计算多时段聚合灵活性,需要考 虑下面几类因素。①第1类因素是多个时段的聚合 灵活性之间的耦合关系,这一关系来源于温控负荷、 电动汽车等设备的运行特性,例如多个时段的累积 充电量需要满足用户需求。②第2类因素是FLVPP 内部柔性负荷所在的电力网络约束对评估聚合灵活 性的影响。文献[18]指出由于柔性负荷所在馈线发 生输电拥塞,FLVPP的聚合灵活性减少。③第3类 因素,也是现有研究经常忽略的,是柔性负荷的运 行状态在一个调度时段内可能发生变化(例如用户 在15 min的调度时段的中间时刻调整空调的设定温 度),以及柔性负荷在响应调度指令时存在的时延响 应^[19-20]。后者指的是当各个柔性负荷开始追踪电网

向FLVPP下发的调度指令时,由于难以避免的通信 延迟、通信数据丢包等问题,柔性负荷的总功率无法 立刻跟踪指令,在总体上表现为FLVPP对电网下发 的调控指令存在一段动态的追踪过程。这一动态追 踪过程的时间尺度显然小于电网调度指令下发周 期,并将在一定程度上影响FLVPP的聚合灵活性。 本文将考虑这类因素的聚合灵活性称为FLVPP的 "动态聚合灵活性"。显然,为准确评估动态聚合灵 活性,需要建立比电网调度指令下发周期更加精细 的时间颗粒度,并以此为基础构建动态聚合灵活性 的评估模型。

针对以上因素,本文提出了关于FLVPP的多时 段动态聚合灵活性的多时间颗粒度鲁棒评估方法。 在多时间颗粒度评估框架中,以细时间颗粒度构建 柔性负荷个体运行模型、中时间颗粒度作为聚合灵 活性的时间分辨率、粗时间颗粒度对应多时段的时 间窗口。基于多时间颗粒度,本文采用两阶段鲁棒 优化构建了聚合灵活性的评估模型,考虑了多个时 段灵活性的耦合关系和电力网络拥塞对FLVPP聚 合灵活性的影响。针对储能和电动汽车充放电行为 带来的整数决策变量,采用了嵌套列和约束生成 (column-and-constraint generation,C&CG)算法进行 求解。

1 多时间颗粒度评估的思想

本节以FLVPP参与日内滚动调度为例介绍多时间颗粒度的评估思想。在此场景下,粗时间颗粒度(长度为H)对应日内滚动时间窗长度,中时间颗粒度(长度为T)对应电网调度指令下发周期,细时间颗粒度(长度为t)对应分钟级时间尺度。FLVPP首先向上级调度中心提供多时段聚合灵活性;然后,调度中心根据上报的聚合灵活性下发调度指令; 最后,由FLVPP对电网下发的调度指令进行分解并交由各柔性负荷进行响应。多时间颗粒度的关系如图1所示。为便于绘图,图中设H为60min,T为





Fig.1 Relationship of multi-time granularity

15 min,t为1 min,即1个日内滚动时间窗包含4个调度周期,每个调度周期可进一步细分为15个细时间颗粒度。

粗时间颗粒度、中时间颗粒度的意义易于理解。 为便于接入电网滚动调度环节,FLVPP的多时段聚 合灵活性应与滚动时间窗长度相同,以反映多时段 之间的耦合特性,此对应为粗时间颗粒度;同时,为 便于调度人员使用,聚合灵活性的时间分辨率应当 等于电网调度指令下发周期,即由以15 min为单位 的数学模型进行刻画,此对应为中时间颗粒度。这 2类时间颗粒度已有文献涉及,但是引入细时间颗 粒度的方法目前还较为罕见,因此下面将简要分析 其意义。

细时间颗粒度主要用于2处。首先,用于柔性 负荷建模。这是因为柔性负荷易受环境和用户心理 变化的影响,在15 min的调度周期内可能发生1次 或多次的状态变化,采用中时间颗粒度时间尺度无 法准确反映这一特点,因此需要采用更加精细的时 间颗粒度。其次,细时间颗粒度便于刻画后续 FLVPP对电网下发的调度指令的动态追踪过程。如 上文所述,电网之后会根据FLVPP上报的聚合灵活 性下发调度指令由后者响应,因而FLVPP在计算灵 活性时应当预估其自身对调度指令的响应能力,并 以之为确定聚合灵活性的重要约束条件,以防误报。 但是,在FLVPP对电网下发的调度指令进行分解并 交由柔性负荷进行响应的过程中,由于信息通路不 通畅导致的信息延迟、丢包以及柔性负荷本身的响 应速率差异引发的非同时动作现象,会导致FLVPP 实际上无法立即追踪电网下发的调度指令。特别是 当FLVPP内含有数目较多、具有不同响应速率的柔 性负荷时,从FLVPP接收到电网调度指令到完全追 踪该指令,其中可能存在长达几十秒乃至数分钟的 动态追踪过程,如何在数学上刻画这一动态追踪过 程将在第2节给出。需要指出的是,细时间颗粒度 指的是模型的最小时间分辨率。对于响应速度较慢 或不易波动的资源(如某些类型的储能、电动汽车 等),其模型时间分辨率也可以取5 min或15 min(即 以5个或15个细时间颗粒度为一个评估时间单位), 这样有助于降低评估模型的维度。

基于上述已阐述的3类时间颗粒度,下文将基 于两阶段鲁棒优化构建FLVPP动态聚合灵活性计 算模型。

2 动态聚合灵活性的鲁棒评估模型

2.1 基于"预评估-模拟响应"的两阶段评估流程

FLVPP动态聚合灵活性的评估过程需要在电网 调度开始前完成。若FLVPP参与电网滚动调度,则 可以视系统需求每隔几十分钟或者1h重新评估一

次,再重新上报。

评估分为预评估和模拟响应2个阶段。开启预 评估阶段前,首先需要收集FLVPP内所有柔性负荷 的物理参数和状态信息(详见附录A),并预测它们 在未来一段时间的变化情况之后,对FLVPP的聚合 灵活性范围进行第一次预评估,确定大致的上下界。 然后,在模拟响应阶段中,考虑电网下发的所有可能 的对聚合灵活性的调用指令,校验其是否能够被柔 性负荷进行响应。一旦发现有无法被响应的调度指 令,就表明之前预评估阶段给出的灵活性范围不够 准确,此时需要进行再次预评估,通过添加附加条件 (如惩罚项),修正聚合灵活性的上下界,直至所有可 能的电网调度指令都能够被柔性负荷进行响应。最 后得到了FLVPP的多时段动态聚合灵活性。这一 两阶段评估方法的流程图如图2所示。



图2 FLVPP动态聚合灵活性的两阶段评估流程图

Fig.2 Flowchart of two-stage evaluation for FLVPP dynamic aggregation flexibility

本文假设FLVPP能够在不触及用户隐私的前 提条件下获得柔性负荷的必要参数信息。当用户对 这些信息较为敏感时,可以使用数据加密的方法保 护隐私,如信息遮蔽技术^[21]可以在保护隐私的同时 不影响计算结果的正确性。因此,本文暂不考虑用 户隐私所带来的数据获知问题。

下文用*i*表示一个长度为*H*的粗时间颗粒度(如日内滚动时间窗长度)内的各中时间颗粒度的索引号,此外中时间颗粒度长度为*T*(如电网调度指令下发周期为15 min),故*i*=1,2,…,*H*/*T*,即每个*i*表示一个调度周期。同理,设一个中时间颗粒度*i*内含有若干个细时间颗粒度,用*k*表示细时间颗粒度索引号,设细时间颗粒度为1 min,则*k*=1,2,…,*T*,即每个*k*表示1 min。因此,除特殊说明外,下文中*i*和*k*

的范围分别为*i*=1,2,…,*H*/*T*和*k*=1,2,…,*T*。考虑 到柔性负荷通常可以分为单向能量交换型和双向能 量交换型^[2],因此本文分别选取温控负荷、电动汽 车、储能作为本文柔性负荷的研究对象。

2.2 预评估阶段

2.2.1 约束

预评估阶段可视为对 FLVPP 动态聚合灵活性的"乐观"估计,并不直接考虑电网可能下发的调度 指令能否被各个柔性负荷响应。因此该阶段下约束 条件仅考虑动态聚合灵活性应在 FLVPP 所有柔性 负荷的功率上下界之和内部,数学形式如下:

$$\bar{P}_{i}^{\text{AGG}} \leq \sum_{n \in N_{i}^{\text{TCL}}} \bar{P}^{\text{tcl},n} + \sum_{n \in N_{i}^{\text{IS}}} \bar{P}^{\text{es},n} + \sum_{n \in N_{i}^{\text{EV}}} \bar{P}^{\text{ev},n}$$
(1)

$$\underline{P}_{i}^{AGG} \ge \sum_{n \in N_{i}^{TCL}} \underline{P}^{\text{tcl}, n} + \sum_{n \in N_{i}^{SS}} \underline{P}^{\text{es}, n} + \sum_{n \in N_{i}^{W}} \underline{P}^{\text{ev}, n}$$
(2)

式中: \bar{P}_{i}^{ACG} 、 \underline{P}_{i}^{ACG} 分别为第i个调度周期中待评估 FLVPP所能调度的功率上、下限; $\bar{P}^{\text{tel},n}$ 、 $\underline{P}^{\text{tel},n}$ 和 $\bar{P}^{\text{es},n}$ 、 $\underline{P}^{\text{es},n}$ 以及 $\bar{P}^{\text{ev},n}$ 、 $\underline{P}^{\text{ev},n}$ 分别为第n个温控负荷和储能以 及电动汽车的用电功率上、下限; N_{i}^{TCL} 、 N_{i}^{ES} 、 N_{i}^{EV} 分别 为第i个调度周期中参与评估的温控负荷、储能、电 动汽车集合。

2.2.2 目标函数

预评估阶段的目标为求得多时段的FLVPP最大动态聚合灵活性。单时段的动态聚合灵活性可以用 $\bar{P}_{i}^{AGG} - \underline{P}_{i}^{AGG}$ 表示,多时段的动态聚合灵活性可行域可以看作由各个时段对应维度的可行域组成的多面体,而要想求得最大的可行域范围,等效于最大化这个多面体的体积^[3,16-17]。因此,可将目标函数表示为如下形式:

$$\max_{P_{i}^{AGG}, \bar{P}_{i}^{AGG} \in \Omega_{y}} \prod_{i} \left(\alpha \bar{P}_{i}^{AGG} - \beta \underline{P}_{i}^{AGG} \right)$$
(3)

式中: α 、 β 分别为聚合模型对 \bar{P}_{i}^{AGC} 、 \underline{P}_{i}^{AGC} 的建模权 重,且 α , $\beta \in [0,1]$; Ω_{y} 表示约束式(1)和式(2)。当负 荷高峰时可以调高 β 的值,以提供更大的向下调节 能力;当负荷低谷时可以调高 α 的值,以提供更大的 向上调节能力。

但在实际求解中,目标函数中含有乘积项(或者 对数项)并不容易求解。对此可采用一种线性的目 标函数来近似代替式(3),即用最大化多面体的各维 长度之和代替最大化多面体的体积^[13,16],具体表示 如下:

$$\max_{\underline{P}_{i}^{AGG}, \overline{P}_{i}^{AGG} \in \Omega_{j}} \sum_{i} \left(\alpha \overline{P}_{i}^{AGG} - \beta \underline{P}_{i}^{AGG} \right)$$
(4)

2.3 模拟响应阶段

2.3.1 约束

响应阶段的约束包括上级电网调度指令范围约 束和指令分解约束。

1)上级电网调度指令范围约束。

上级电网根据 FLVPP 的动态聚合灵活性范

围下发调度指令,因此第*i*个调度周期中FLVPP 预想的电网调度指令应在预评估阶段给出的 [P^{ACC}, \bar{P}^{ACC}]范围内,表达式如下:

$$\underline{P}_{i}^{\text{AGG}} \leq \underline{P}_{i}^{\text{sys}} \leq \overline{P}_{i}^{\text{AGG}} \tag{5}$$

式中:P^{sys}为FLVPP预想的电网将向其下发的第*i*个调度周期中的调度指令。

为模拟所有可能的调度指令,使用鲁棒优化的 建模思想来考虑所有可能的指令,即将所有可能出 现的指令的范围(式(5))建立为鲁棒优化的不确定 性集,进而判断该指令不确定性集中是否存在不可 行的指令,具体见2.4节中的模型和解释。

2)指令分解约束。

FLVPP需要对调度指令 P^{sss}分解和下发给各柔性负荷进行响应,同时满足包括柔性负荷运行约束、各柔性负荷所在电力网络的安全约束等约束。指令分解约束表示如下:

$$-v_{i,k}^{-} - e_{i,k}^{-} \leqslant P_{i}^{\text{sys}} - \sum_{n \in N_{i}^{\text{TCL}}} \left(p_{i,k}^{\text{tcl},n} - p_{0}^{\text{tcl},n} \right) + \sum_{n \in N_{i}^{\text{tS}}} \left(p_{i,k}^{\text{es, ch},n} - p_{i,k}^{\text{es, dis},n} \right) \\ p_{i,k}^{\text{es, dis},n} \right) + \sum_{n \in N_{i}^{\text{tV}}} \left(p_{i,k}^{\text{ev, ch},n} - p_{i,k}^{\text{ev, dis},n} \right) \leqslant v_{i,k}^{+} + e_{i,k}^{+}$$
(6)

式中:松弛变量 $e_{i,k}^*$ 、 $e_{i,k}^-$ 分别为第i个调度周期中k时间内允许的向上、向下偏差量;松弛变量 $v_{i,k}^*$ 、 $v_{i,k}^-$ 分别为第i个调度周期中k时间内超过允许范围的向上、向下偏差量; $p_{i,k}^{\text{tel},n}$ 、 $p_0^{\text{tel},n}$ 分别为第i个调度周期中k时间内第n个温控负荷的运行功率、维持设定温度的额定功率,两者之差表示温控负荷的可调功率; $p_{i,k}^{\text{eschn}}$ 、 $p_{i,k}^{\text{eschn}}$ 分别为第i个调度周期中k时间内第n个储能的充电、放电功率; $p_{i,k}^{\text{eschn}}$ 、 $p_{i,k}^{\text{eschn}}$ 分别为第i个调度周期中k时间内第n个储能的充电、放电功率; $p_{i,k}^{\text{eschn}}$ 、 $p_{i,k}^{\text{eschn}}$ 分别为第i

约束式(6)表示检查 FLVPP能否响应预想的电 网下发的调度指令,即将指令分解给内部各柔性负 荷进行响应,使它们的总功率能匹配调度指令 P_i^{sys} 。 需要指出的是,由于之前的预评估可能过高地估计 了真实的聚合灵活性范围,因此 $\left[\underline{P}_i^{ACG}, \bar{P}_i^{ACG}\right]$ 中可能 存在实际上无法被响应的调度指令。对此,利用 $e_{i,k}^*, e_{i,k}^*$ 表示调度周期内允许的功率偏差, $v_{i,k}^*, v_{i,k}^*$ 表示 超过允许范围的功率部分,而 FLVPP 应最小化 $v_{i,k}^*$ 、 $v_{i,k}^{-13]},具体过程将在2.3.2节中介绍。$

允许偏差量约束表示如下:

$$\begin{cases} \sum_{k} (e_{i,k}^{+} - e_{i,k}^{-}) \leq \Gamma_{i} \\ \sum_{k=4,5,\cdots,15} (e_{i,k}^{+} - e_{i,k}^{-}) = 0 \\ v_{i,k}^{+}, v_{i,k}^{-}, e_{i,k}^{+}, e_{i,k}^{-} \geq 0 \end{cases}$$
(7)

式中: Γ_i 为第i个调度周期中的最大允许偏差功率。 在理想的通信环境下,可设置 Γ_i 接近0,表示 FLVPP 可以近乎瞬时地响应电网的调度指令。 约束式(7)保证一个调度周期中允许偏差量的 总和在设定范围内,并且允许偏差量 $e_{i,k}^{+}$ 、 $e_{i,k}^{-}$ 仅在每 个调度周期的前3 min起作用。

在指令分解的过程中,首先要保证在柔性负荷 的可运行范围内进行分解,即:

$$\begin{cases} p_{i,k}^{\text{tcl},n} \in \Omega^{\text{tcl}} \\ p_{i,k}^{\text{es, ch},n}, p_{i,k}^{\text{es, dis, }n} \in \Omega^{\text{es}} \\ p_{i,k}^{\text{ev, ch, }n}, p_{i,k}^{\text{ev, ch, }n} \in \Omega^{\text{ev}} \end{cases}$$
(8)

式中: Ω^{rel} 、 Ω^{ev} 分别为温控负荷、储能、电动汽车的可运行区域。具体设备模型如附录 B 所示,其中温控负荷的建模时间颗粒度为 1 min,电动汽车和储能的建模时间颗粒度为 15 min。

同时要保证线路传输功率在规定范围内,表示如下:

$$\left| \sum_{n \in N_{i}^{\text{rCL}}} H_{l}^{\text{tcl},n} \left(p_{i,k}^{\text{tcl},n} - p_{0}^{\text{tcl},n} \right) + \sum_{n \in N_{i}^{\text{tS}}} H_{l}^{\text{es},n} \left(p_{i,k}^{\text{es},\text{ch},n} - p_{i,k}^{\text{es},\text{dis},n} \right) + \sum_{n \in N_{i}^{\text{tS}}} H_{l}^{\text{ev},n} \left(p_{i,k}^{\text{ev},n} - p_{i,k}^{\text{ev},\text{ch},n} - p_{i,k}^{\text{ev},\text{ch},n} \right) \right| \leq f_{l}^{\max} \quad l \in N^{1}$$
(9)

式中: N^{l} 为传输线路集合; $H_{l}^{tel,n}$ 、 $H_{l}^{es,n}$ 、 $H_{l}^{ev,n}$ 分别为第 n个温控负荷、储能、电动汽车对第l条线路功率的 传输分布因子; f_{l}^{max} 为第l条线路传输容量。约束式 (9)体现了网络拥塞对聚合灵活性的影响,忽略该因 素可能会误估实际的聚合灵活性。

2.3.2 目标函数

针对预评估阶段获得的 FLVPP 聚合灵活性功 率范围,模拟响应阶段搜索该范围内是否存在超出 FLVPP 的聚合灵活性而无法被分解的调度指令。该 阶段的目标函数 Q 如下:

 $Q = \max_{\underline{P}_{i}^{ACC} < P_{i}^{as} < \bar{P}_{i}^{as} < \bar{P}_{i}^{ACC}} \min_{v_{i,k}^{+} < \bar{v}_{i,k} \in \Omega_{i}(\underline{P}_{i}^{ACC}, \bar{P}_{i}^{ACC}, P_{i}^{as})} M \sum_{i,k} (v_{i,k}^{+} + v_{i,k}^{-}) \quad (10)$

式中:M为惩罚系数; Ω_x 表示约束式(6)—(9)。非负 松弛变量 $v_{i,k}^*, v_{i,k}^-$ 为反映调度指令能否被响应的指 标,调度指令在允许偏差范围内能被完全分解时,最 小化松弛变量 $v_{i,k}^*, v_{i,k}^-$ 的和为0,而 $v_{i,k}^*$ 或 $v_{i,k}^-$ 为正表示 此时的调度命令不能在允许范围内被分解响应,此 时将以惩罚项的形式增添至目标函数中。

引入松弛变量 $e_{i,k}^*, e_{i,k}^*, v_{i,k}^*, y_{i,k}^*, y_$

调度周期内允许的功率偏差范围可通过*Γ*,调整。考虑不同动态追踪过程的聚合灵活性变化如

图 3 所示,图中实线表示通过评估获得的动态聚合 灵活性范围,虚线、点划线表示调度指令下达后柔性 负荷的动态追踪过程。下面将以第 2 个调度周期 i_2 为例,说明本文模型考虑动态追踪过程对 FLVPP动 态聚合灵活性的影响。FLVPP需要根据可接受波动 能力和柔性负荷群的响应速度,设置 k_1,k_2,k_3 (细时 间颗粒度)时间内动态追踪过程的最大容忍偏差。 动态追踪过程产生的偏差量在该容忍偏差内是系统 所能接受和消纳的,此时 $e_{i,k}^*,e_{i,k}^*$ 未超过 $\Gamma_i,v_{i,k}^*,v_{i,k}$ 保 持为0;当动态追踪过程的偏差量超过该容忍偏差 时,偏差量超出最大允许偏差 Γ_i ,超出的部分可以通 过 $v_{i,k}^*,v_{i,k}^*$ 来表示,而 $v_{i,k}^*,v_{i,k}^*$ 中存在正值,将以惩罚项 的形式增添到目标函数中,削减无法快速响应的灵 活性。



---- 不可接受偏差,---- 最大容忍偏差,--- 允许偏差

图 3 FLVPP 聚合灵活性与动态追踪过程容忍偏差的关系

Fig.3 Relationship between aggregation flexibility of FLVPP and tolerance deviation in dynamic tracking process

2.4 评估 FLVPP 动态聚合灵活性的完整模型

综合上文的评估阶段和模拟响应阶段,可以得 到鲁棒评估方法的数学模型如下:

对于该问题,第一阶段对应的是预评估阶段,决 策变量为FLVPP的聚合灵活性范围,第二阶段对应 的是模拟响应阶段。电网下发的调度指令是第二阶 段问题的不确定量,在FLVPP的聚合灵活性范围 内。换言之,FLVPP的聚合灵活性范围是第二阶段 问题的不确定集合,如果对于该不确定集合内所有 的调度指令,FLVPP都能将其分解至各柔性负荷进 行完全响应,那么第一阶段给出的聚合灵活性就是 满足要求的。

为使算法部分的表达更加简洁,模型式(11)可 写为如下紧凑形式:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{y}\in\Omega_{\gamma}} \left\{ c\mathbf{y} + \max_{u\in\hat{D}^{n}(\mathbf{y})} \min_{\mathbf{x}\in\Omega_{\gamma}(\mathbf{y},u)} d\mathbf{x} \right\} \\ \text{s.t.} \quad A\mathbf{y} \ge \mathbf{b} \\ Fu \ge \mathbf{h} + K\mathbf{y} \\ E\mathbf{x} + Gz \ge f - Ru \end{cases}$$
(12)

式中:第一阶段变量 $y = [\bar{P}_i^{AGG}, \underline{P}_i^{AGG}]$;第二阶段外层 变量 $u = [P_i^{sys}]$,内层的连续变量 $x = [p_{i,k}^{tel,n}, p_{i,k}^{es.ch.n}, p_{i,k}^{es.dis.n}, p_{i,k}^{ev.ch.n}, p_{i,k}^{es.ch.n}, E_{i,k}^{ev.ch.n}, E_{i,k}^{ev.ch.n}, v_{i,k}^{tel,n}, P_{i,k}^{es.ch.n}, z_{i,k}^{es.ch.n}, z_{$

从约束式(12)的形式中不难发现,第二阶段不确定性参数 u 的范围取决于第一阶段优化变量 y 的 决策,构成了典型的决策依赖不确定集(decision-dependent uncertainty, DDU)。包含 DDU 的鲁棒优化问题通常是难以求解的,本文使用数学转换将含 DDU 的鲁棒优化问题转为非决策依赖不确定集的 普通鲁棒优化问题,降低了求解难度。转换和推导 过程见附录 D,转换后的形式如式(13)所示,式中的 变量解释见附录 D。

$$\begin{cases} \min_{y \in \Omega_{y}} \left\{ cy + \max_{\mu \in \widehat{\Omega}^{v}} \min_{x \in \Omega_{x}(y, u)} dx \right\} \\ \text{s.t.} \quad Ay \ge b \qquad (13) \\ Fu \ge h \\ Ex + Gz \ge f - R(D + \operatorname{diag}(u)L)y \end{cases}$$

3 嵌套C&CG算法

通常,鲁棒优化问题可以通过 Benders 分解算法 或者 C&CG 算法进行优化计算,这 2种算法都是将 复杂的多阶段问题分解为主问题和子问题,通过主、 子问题迭代求得最优解。但是,储能和电动汽车约 束中引进了二进制整数变量,使子问题成为难以求 解的混合整数规划问题。针对此问题,文献[22]提 出了一种嵌套 C&CG 算法,该方法是在经典 C&CG 算法的子问题内嵌套了一层 C&CG 算法,有利于解 决经典 C&CG 算法中子问题难求解的问题。本文基 于该嵌套 C&CG 算法设计了求解方法。下面简单介 绍嵌套 C&CG 算法的计算思路,详细的计算公式及 推导过程见附录E。

步骤1,对外层C&CG问题进行初始化,初始 化上、下界分别为 \bar{B} =+∞、<u>B</u>=-∞,初始化迭代次数 l=0,确定收敛终止条件阈值 ε 。

步骤 2,求解外层 C&CG 主问题,得到最优解 (y_{l+1}^*, η_{l+1}^*),更新下界 <u>B</u>= $cy_{l+1}^* + \eta_{l+1}^*$,其中 η_{l+1}^* 为迭代 过程中表征内层问题的中间变量。检验是否满足收 敛条件 <u>B</u>-<u>B</u> $\leq \varepsilon$,若满足收敛条件,则终止步骤 2并 返回y*1,求解结束;否则,继续求解。

172

步骤3,求解内层C&CG问题。①初始化本次迭 代中的内层问题,初始化上、下界分别为 $\bar{B}'=+\infty, \underline{B}'=-\infty$,初始化迭代次数l'=0,确定收敛终止条件阈值 ε' 。 ②基于步骤2确定的 $y_{l+1}^*, \Leftrightarrow \hat{y}=y_{l+1}^*, 求解内层主问$ $题,得到最优解<math>u_{l'+1}^*, \mathbb{P}$ 新内层问题的上界 $\bar{B}'=Q(\hat{y})$ 。 检验是否满足收敛条件 $\bar{B}'-\underline{B}' \leq \varepsilon'$,若满足收敛条 件,则终止内层问题(步骤3)并返回 $u_{l+1}^*=u_{l'+1}^*,$ 跳 至步骤4;否则,继续求解。③求解内层子问题,可 得到最优解 $(x_{l'+1}^*, z_{l'+1}^*)$,更新内层问题的下界<u>B'=</u>max {<u> $B'</u>, dx_{l'+1}^*$ }。检验是否满足收敛条件 $\bar{B}'-\underline{B}' \leq \varepsilon'$, 若满足收敛条件,则终止内层问题(步骤3)并返回 $u_{l+1}^*=u_{l'+1}^*,$ 就至步骤4;否则,继续求解。④求解内层子问题,可 得到最优解 $(x_{l'+1}, z_{l'+1}^*)$,更新内层问题的下界<u>B'=</u>max {<u> $B', dx_{l'+1}^*$ </u>}。检验是否满足收敛条件<u> $\bar{B}'=B'\leq\varepsilon'$, 若满足收敛条件,则终止内层问题(步骤3)并返回 $u_{l+1}^*=u_{l'+1}^*,$ 承受步骤4;否则,继续求解。④新增变量 $x_{l'+1}, \pi_{l'+1}$ 及与整数参数 $z_{l'+1}^*$ 相关的一系列约束至内 层主问题, $\Diamond l'=l'+1, 返回步骤②。$ </u></u>

步骤4,新增变量 x_{l+1} 、 π_{l+1} 及与参数 u_{l+1}^* 相关的 一系列约束至外层C&CG主问题,令l=l+1,返回 步骤2。

重复以上步骤,直至满足收敛条件,结束求解。

4 算例仿真

4.1 仿真设置

本文在仿真中模拟了一处柔性负荷群,并将该 柔性负荷群聚合为FLVPP,包含100个温控负荷、 2个储能设备和4座电动汽车充电桩。温控负荷 包含空调和电暖炕这2种设备,其参数设置和开关 时序如附录F所示;储能容量的上限和下限分别为 50 kW·h和10 kW·h,充放电功率极限为20 kW,充 放电效率为90%,自耗率为2%;电动汽车充电桩的 最大充放电功率为60 kW,电动汽车的最大容量极 限为60 kW·h,充放电效率为90%。

本文在 MATLAB 2020a 平台下,通过 YALMIP 工具箱调用 GUROBI 求解器进行求解。仿真中的粗 时间颗粒度为 60 min,中时间颗粒度为 15 min,细时 间颗粒度为 1 min。权重系数 α 和 β 均取 1。

下面将分别从细时间颗粒度、动态追踪过程、网络约束和计算性能角度进行仿真分析。

4.2 与未考虑细时间颗粒度评估方法的对比分析

目前较常见的方法未考虑细时间颗粒度的评估 需求,尽管部分文献如文献[13,16]等采用多周期鲁 棒优化的方法提高了评估过程的保守性,但仍然无 法针对调度周期内的分钟级负荷变化进行评估。为 了验证采用本文提出的含细时间颗粒度(1 min级) 动态聚合灵活性鲁棒评估方法的必要性,首先对比 分析了本文方法(考虑细时间颗粒度)和未考虑细时 间颗粒度的多时段鲁棒评估方法(如文献[13]中的 方法)的评估结果,如图4所示。图中数值为正表示 向上聚合功率,数值为负表示向下聚合功率,上下2 条曲线之间的范围表示可调度的聚合功率区域, 后同。



在图4(a)中,考虑了细时间颗粒度的聚合方法 能够根据15 min内柔性负荷的启停变化修正聚合灵 活性。在柔性负荷逐渐开启的阶段,考虑多时间颗 粒度的评估方法能够捕捉到15 min内即将开启的柔 性负荷,进一步挖掘了柔性负荷群在调度周期内的 实际灵活性,因而得到了更大的FLVPP聚合功率范 围。在[08:15,08:30)时段内,未考虑细时间颗粒度 的评估方法仅可获得194.1 kW的向上聚合功率,而 本文方法所评估的向上聚合功率为293.6 kW,提升 了约51%的灵活性范围。

类似地,在柔性负荷逐渐关闭的阶段,考虑多时 间颗粒度的评估方法能够修正未考虑15 min内即将 关闭的柔性负荷而引起的聚合灵活性的错误估计。 从图4(b)可以看出,在[18:00,18:15)时段,未考虑 细时间颗粒度的方法过度估计了75.4 kW的向上聚 合功率。这个偏差约占FLVPP聚合功率灵活性范 围的25%。如果系统中相当比例的FLVPP的聚合 灵活性评估结果都有类似程度的偏差,那么电网的 安全经济运行将受到影响。

综上,本文方法可以考虑调度周期内的负荷变 化,因此可以提供更加准确的评估结果。

4.3 动态追踪过程允许偏差对柔性负荷聚合灵活 性的影响

正如第2节所描述的,在电网下发调度指令后, 由于通信延迟等原因导致柔性负荷群的聚合灵活性 范围存在动态追踪过程,而不同工况下,系统对这种 动态过程的容忍能力存在差异。本节将通过仿真探 究允许偏差对动态聚合灵活性的影响。在07:45— 08:45时段设置不同允许偏差量,结果如表1所示, 其中允许偏差量用*Γ*表示。

表1 不同偏差量下的 FLVPP 动态聚合功率

Table 1 Dynamic aggregation power of PLVPP under different deviations

Γ / kW	FLVPP动态聚合功率范围 / kW				
	[07:45,08:00)	[08:00,08:15)	[08:15,08:30)	[08:30,08:45)	
0	[48,181]	[114,212]	[-296,296]	[341,397]	
20	[48,188]	[114,215]	[-296,293]	[341,396]	
40	[48,198]	[114,215]	[-296,290]	[341,395]	
60	[48,203]	[114,221]	[-296,295]	[341,384]	
80	[48,203]	[114,230]	[-296,287]	[341,387]	

以[07:45,08:00)时段为例进行说明,随着允 许偏差量由0逐步增大至80kW,向上聚合功率灵活 性也受其影响从181kW增大为203kW,释放了约 12%的聚合灵活性。这是由于扩大FLVPP的允许 偏差量 Γ,代表系统能容忍更大程度的动态响应波 动,即降低了对动态追踪过程中波动性的要求,以此 换取更大的聚合灵活性。在实际应用中,可以根据 系统对动态追踪过程的容忍度大小,调整允许偏差 量,从而在FLVPP波动可接受范围内,充分利用 FLVPP的聚合灵活性。

4.4 考虑网络约束的 FLVPP 动态聚合灵活性评估

柔性负荷大量分布在配电网中,一旦出现网络 拥塞,将会影响FLVPP的聚合灵活性。本节通过逐 步减少线路传输容量,分析不同程度网络拥塞对 FLVPP聚合灵活性的影响,结果如图5所示,图中 Case 1下线路传输容量充足,代表不会发生网络拥 塞的情景,Case 2下在某些时刻会发生网络拥塞, Case 3下的网络拥塞最为严重。



dynamic aggregation power

从Case 1和Case 2的对比可以发现,在[08:15, 08:45)时段,可以观察到由于发生网络拥塞,Case 2 下的 FLVPP 的动态聚合灵活性范围明显减少,在 [08:30,08:45)时段的向下聚合灵活性从 246 kW 骤 降至 98 kW。而在线路传输容量最小、网络拥塞最为严重的 Case 3, FLVPP 的聚合灵活性减少得更加 明显。

上述结果说明在评估FLVPP的动态聚合灵活性时,考虑电力网络约束的影响十分必要,否则可能

产生错误的评估结果。

4.5 嵌套C&CG算法的计算性能分析

本节以包含100个温控负荷、2个储能设备和 2辆电动汽车组成的FLVPP为例进行计算性能分 析。使用本文方法对该FLVPP聚合灵活性进行评 估的迭代过程及求解时间如表2所示,迭代次数和 迭代中上下界变化见附录G。

表2 典型求解过程中变量和迭代时间的变化

 Table 2
 Variation of variables and iteration times during typical solution process

嵌套C&CG算法的 迭代次数	主问题中 变量数目	主问题中 约束数目	本轮迭代 求解时间/s
0	9	9	—
1	12317	12294	9.1
2	24625	24 579	43.9
3	36933	36864	50.6

表2结果表明,评估过程需要经历3次迭代,每次迭代过程分别在主问题中增添12308个变量(包含24个整数变量)和12285个约束,总的评估求解时间约为103.6 s。而对于第4节中其他的算例仿 真,嵌套C&CC算法的迭代次数几乎不超过5次,总 求解时间在40~120 s内。如上文所述,在电网滚动 调度环节中,如果FLVPP每隔几十分钟或者1h重 新评估一次聚合灵活性,那么耗费2 min左右的计算 时间可以满足使用要求。

5 结论

本文提出了一种考虑多时间颗粒度的FLVPP 动态聚合灵活性的鲁棒评估方法,所得结论如下。

1)建立了包含滚动调度时间窗、调度周期和分钟级3个时间尺度的聚合灵活性多时间颗粒度评估 方法,可以考虑多时段耦合、电力网络拥塞、负荷运 行状态在一个调度周期内发生变化以及时延追踪响 应的影响。

2)构建了适用于含整数变量的多种柔性负荷的 聚合灵活性鲁棒评估模型,利用数学变换,将这一含 决策依赖不确定量的复杂优化问题转化为常见的两 阶段鲁棒优化问题,并采用嵌套 C&CG 算法进行 求解。

3)算例分析表明,本文提出的多时间颗粒的评估方法可以更加准确地评估FLVPP的动态聚合灵活性。同时,通过仿真验证了在评估聚合灵活性时考虑电力网络约束的必要性,展示了不同动态追踪过程允许偏差量对动态聚合灵活性的影响。

本文在研究中假定负荷的状态都是可以获知 的,未来将基于精细时间尺度,考虑负荷状态的辨识 方法,覆盖更多类型的柔性负荷,并进一步考虑负荷 模型中的不确定性参数的影响,增强方法的适用性。 「更加高效的筧法以降」 [11] HAO H

在算法方面,也将进一步研究更加高效的算法以降 低求解时间。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

174

- [1] 周竟,耿建,唐律,等. 可调节负荷资源参与电力辅助服务市场 规则分析与思考[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):120-127.
 ZHOU Jing, GENG Jian, TANG Lü, et al. Rule analysis and cogitation for adjustable load resources participating in ancillary service market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(7):120-127.
- [2]齐宁,程林,田立亭,等.考虑柔性负荷接入的配电网规划研究 综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(10):193-207.
 QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(10):193-207.
- [3] 吴文传,张伯明,孙宏斌,等. 主动配电网能量管理与分布式资源集群控制[J]. 电力系统自动化,2020,44(9):111-118.
 WU Wenchuan,ZHANG Boming,SUN Hongbin, et al. Energy management and distributed energy resources cluster control for active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(9):111-118.
- [4] 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.
- [5]米增强,张文彦,贾雨龙.柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的 优化控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(11):15-20,27.
 MI Zengqiang,ZHANG Wenyan,JIA Yulong. Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(11):15-20,27.
- [6] 李嘉娟,艾芊.考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):1-13.
 LI Jiamei,AI Qian. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service [J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):1-13.
- [7] 林毓军,苗世洪,杨炜晨,等.面向多重不确定性环境的虚拟 电厂日前优化调度策略[J].电力自动化设备,2021,41(12): 143-150.

LIN Yujun, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of virtual power plant for environment with multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 143-150.

 [8] 程浩原,艾芊,孙东磊,等. 多微电网虚拟备用模型在计及不确 定性的需求侧资源分配中的应用[J]. 电力自动化设备,2022, 42(2):210-216.
 CHENG Haoyuan, AI Qian, SUN Donglei, et al. Application of multi-microgrid virtual reserve model in demand-side resource

allocation considering uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(2):210-216.

- [9] WANG S, WU W. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [10] MÜLLER F L, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O, et al. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1205-1214.

- [11] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):189-198.
- [12] YI Z, XU Y, WU C. Improving operational flexibility of combined heat and power system through numerous thermal controllable residents aggregation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130:106841.
- [13] JIN H, LI Z, SUN H, et al. A robust aggregate model and the two-stage solution method to incorporate energy intensive enterprises in power system unit commitment [J]. Applied Energy, 2017, 206:1364-1378.
- [14] 陈新和,裴玮,邓卫,等.数据驱动的虚拟电厂调度特性封装方 法[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4816-4828.
 CHEN Xinhe, PEI Wei, DENG Wei, et al. Data-driven virtual power plant dispatching characteristic packing method[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(14):4816-4828.
- [15] 陈瑜玮,王彬,潘昭光,等. 计及用户灵活性和热惯性的多能园 区优化调度:研发及应用[J]. 电力系统自动化,2020,44(23): 29-37.
 CHEN Yuwei,WANG Bin,PAN Zhaoguang, et al. Optimal dis-

patch for multi-energy park considering flexibility and thermal inertia of users: research, development and application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 29-37.

- [16] CUI B,ZAMZAM A, BERNSTEIN A. Network-cognizant timecoupled aggregate flexibility of distribution systems under uncertainties [J]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(5): 1723-1728.
- [17] 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.
- [18] WANG G, LI Z, WANG F. Enhanced sufficient battery model for aggregate flexibility of thermostatically controlled loads considering coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4):2493-2496.
- [19] PENG-YONG K. Effects of communication network performance on dynamic pricing in smart power grid[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(2):533-541.
- [20] FENG C, WANG Y, WANG X Y, et al. Device access optimization for virtual power plants in heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2):1478-1489.
- [21] XIN S, GUO Q, WANG J, et al. Information masking theory for data protection in future cloud-based energy management [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):5664-5676.
- [22] ZHAO L, ZENG B. An exact algorithm for two-stage robust optimization with mixed integer recourse problems [EB / OL]. (2012-01-10) [2022-06-29]. https://optimization-online.org / 2012 / 01 / 3310.

作者简介:



王光瑞

王光瑞(1998—),男,硕士研究生,主 要研究方向为柔性负荷的灵活性聚合和调 度方法(**E-mail**:grwang@mail.sdu.edu.cn);

李正烁(1988—),男,教授,博士研究 生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统 优化调度、综合能源系统协同优化(E-mail: zsli@sdu.edu.cn);

刘聪聪(1998—),女,博士研究生,主 要研究方向为电力市场、电力系统优化调度

 $(E-mail:ccliu@mail.sdu.edu.cn)_{\circ}$

(编辑 李玮)

Voltage and current proportional control for AC capacitor-less grid-forming converter with fault current limitation

GUAN Minyuan, SHEN Jianliang, LOU Ping, LAI Jun, LI Fan, WANG Jianfeng

(Huzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Huzhou 313000, China)

Abstract: By introducing the voltage and current proportional relationship, a capacitor-less vector voltage control is proposed for the high-voltage grid-forming converter. A cascaded control architecture is composed of the proposed outer-loop voltage control and conventional inner-loop current control. The positive-current limitation and negative-sequence current suppression capabilities are retained to prevent the converter from over-current blocking and damage during grid faults. Unlike the conventional outer-loop voltage control, the proposed voltage-current proportional control is developed irrespective of the AC-side shunt filter capacitor, which is suitable for outer-loop voltage control of the high-voltage grid-forming converter. By selecting the specific AC voltage frequency reference, the grid-forming converter can realize either constant voltage operation or virtual synchronous generator (VSG) operation. The time-domain simulative results show that the negative-sequence current suppression and fault ride-through capabilities are automatically realized by the proposed converter control during grid faults. Moreover, the grid-forming converter is prevented from over-current blocking and damage, and can be restored to the normal operation condition when the grid fault is cleared.

Key words: capacitor-less vector voltage control; grid-following; grid-forming; electric converters; voltage and current proportional control; virtual synchronous generator; fault ride-through; unbalanced

(上接第174页 continued from page 174)

Multi-time granularity robust evaluation method for flexible load aggregation flexibility

WANG Guangrui^{1,2}, LI Zhengshuo^{1,2}, LIU Congcong^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,

Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: For flexible load virtual power plant(FLVPP), the robust evaluation method of dynamic aggregation flexibility containing intra-day rolling time window, dispatching cycle, and minute-level multi-time granularity is proposed. The necessity of multi-time granularity evaluation is analyzed. The robust evaluation model for maximizing multi-time period aggregation flexibility is constructed, which takes into account the effects of multi-time period coupling, power network congestion, variation of load operating state during the dispatching period, and time-delay response. This model is a decision-dependent uncertainty optimization model, which can be transformed into a conventional two-stage robust optimization problem using mathematical transformation, and an iterative solution strategy based on nested column-and-constraint generation algorithm is designed for the problem of binary variables existing in the second-stage. Case study analysis verifies that the proposed method can evaluate the aggregation flexibility of FLVPP more accurately than the existing methods. Meanwhile, the necessity of considering the power network constraint in evaluating the aggregation flexibility is verified, and the computational performance of the algorithm is demonstrated.

Key words: flexible load; virtual power plants; robust optimization; multi-time granularity; decision-dependent uncertainty; nested column-and-constraint generation algorithm

附录 A

预评估阶段收集的数据主要分为 2 种,一种是负荷的设备参数,另一种是负荷的状态信息。负荷的 设备参数指的是描述负荷响应能力的设备标称参数,通常是设备铭牌上的参数,如温控负荷的热容、热 阻、标称功率等,这些参数不因时间、位置、状态改变而发生改变,是描述负荷特性的基本信息,这些 信息可以在负荷接入 FLVPP 时由运营商一次性收集,不需要重复采集。负荷状态信息则指的是描述负荷 所处运行状态的状态变量,如温控负荷的室内温度、环境温度等,这些信息在不同的运行状态下不同, 是需要测量和控制的信息,需要每次评估重复采集。预评估阶段需要收集的参数信息如表 A1 所示。

表 A1 预评估阶段需要收集的柔性负荷参数信息表

Table A1 Table of information on flexible load parameter	ers to be collected during pre-assessment stage
--	---

	1	01 0
柔性负荷	设备参数	状态信息
温控负荷	热容、热阻、标称功率、制冷/制热性能系数等	室内实时温度、环境温度、用户设定的舒 适温度范围等
储能	储能接入位置、充放电功率极限、电池容量、最小充电 电量、充放电效率等	实时荷电状态等
电动汽车	充电桩接入位置、充放电功率极限、电池容量、最小充 电电量、充放电效率等	到达充电桩时的电池电量、离去时的目标 电量等

附录 B

本文选取了3种典型的柔性负荷作为研究对象,分别是温控负荷、电动汽车和储能。其中,温控负荷的用电行为易受用户及环境变化影响,选用1 min 作为温控负荷的建模时间尺度,而电动汽车和储能的用电行为受环境波动程度较小,选择15 min 作为电动汽车和储能的建模时间尺度。

B.1 温控负荷

温控负荷通常被建模为一阶的等效热参数模型(equivalent thermal parameters, ETP)来描述其热力 学原理,其温度演变公式可以描述如下。

$$\theta_{i,k}^{\text{tcl},n} = (1 - a^{\text{tcl},n})(\theta_{a}^{\text{tcl},n} - b^{\text{tcl},n}\overline{p}^{\text{tcl},n}q_{i,k}) + a^{\text{tcl},n}\theta_{i,k-1}^{\text{tcl},n}$$

$$a^{\text{tcl},n} = e^{-\Delta T_{1}/(R_{\text{th}}^{\text{tcl},n}C_{\text{th}}^{\text{tcl},n})}, b^{\text{tcl},n} = R_{\text{th}}^{\text{tcl},n}\eta^{n}$$
(B1)

式中: $\theta_{i,k}^{\text{tcl,n}}$ 为第*n*台温控负荷在*k*时刻的室内温度、环境温度; $\overline{p}^{\text{tcl,n}}$ 为第*n*台温控负荷的最大输出 功率; $R_{th}^{\text{tcl,n}}$ 、 $C_{th}^{\text{tcl,n}}$ 分别为第*n*台温控负荷的热阻、热容; η^{n} 为温控负荷的制冷/制热性能系数; $q_{i,k}$ 为二 进制开关状态变量, $q_{i,k} = 1$ 表示温控负荷处于运行状态, $q_{i,k} = 0$ 表示温控负荷处于关闭状态; $\Delta T_1 = 1$ min 为温控负荷的离散时间间隔。

为了得到易于求解的形式,对温控负荷的功率进行连续化处理,消除了一阶 ETP 模型里的整数变量, 得到线性功率近似模型如下:

$$\theta_{i,k}^{\text{tcl},n} = (1 - a^{\text{tcl},n})(\theta_{a}^{\text{tcl},n} - b^{\text{tcl},n} p_{i,k}^{\text{tcl},n}) + a^{\text{tcl},n} \theta_{i,k-1}^{\text{tcl},n}$$

$$p_{i,k}^{\text{tcl},n} \in [0, \bar{p}^{\text{tcl},n}]$$
(B2)

温控负荷的状态变量的约束如下:

$$0 \le p_{i,k}^{\text{tcl},n} \le \overline{p}^{\text{tcl},n} \tag{B3}$$

$$\theta_{\rm r}^{\rm tcl,n} - \Delta \theta^n \le \theta_{i,k}^{\rm tcl,n} \le \theta_r^{\rm tcl,n} + \Delta \theta^n \tag{B4}$$

式中: $\theta_r^{\text{tcl},n}$ 为用户指定的设定温度; $\Delta \theta^n$ 为用户指定的温度波动容忍范围。

B.2 储能设备

储能设备受充电上下限功率极限和容量上下限极限约束,可以被建立为如下模型:

$$0 \le p_{i,k}^{\text{es,ch},n} \le \overline{p}^{\text{es,ch},n} z_{i,k}^{\text{es,ch},n}$$
(B5)

$$0 \le p_{i,k}^{\text{es,dis},n} \le \overline{p}^{\text{es,dis},n} z_{i,k}^{\text{es,dis},n}$$
(B6)

$$z_{i,k}^{\mathrm{es,ch},n} + z_{i,k}^{\mathrm{es,dis},n} \le 1 \tag{B7}$$

$$E_{i,k}^{\text{es},n} = \kappa^n E_{i,k-1}^{\text{es},n} + \varepsilon p_{i,k}^{\text{es},\text{ch},n} \Delta T_2 - \frac{p_{i,k}^{\text{es},\text{ch},n} \Delta T_2}{\varepsilon}$$
(B8)

$$\underline{\underline{E}}^{\mathrm{es},n} \le \underline{E}^{\mathrm{es},n}_{i,k} \le \overline{\underline{E}}^{\mathrm{es},n} \tag{B9}$$

式中: $p_{i,k}^{\text{es,ch,n}}$ 、 $p_{i,k}^{\text{es,dis,n}}$ 分别为第n台储能设备在k时刻的充电功率、放电功率;二进制整数变量 $z_{i,k}^{\text{es,ch,n}}$ 、 $z_{i,k}^{\text{es,dis,n}}$ 分别为充电、放电状态; $E_{i,k}^{\text{es,n}}$ 为第n台储能设备在k时刻的充电状态; $\bar{p}^{\text{es,ch,n}}$ 、 $\bar{p}^{\text{es,dis,n}}$ 分别为充电功率极限; $\bar{E}^{\text{es,n}}$ 、分别为充电状态上限、下限; κ^n 为自放电系数; ε 为充放电效率系数; $\Delta T_2 = 15$ min 为储能离散时间间隔。

B.3 电动汽车

电动汽车本质上相当于移动式储能,但只有当电动汽车停靠在充电桩时,才可以与电网交换功率。 考虑到电动汽车的到达和离去时间,本文将电动汽车建模如下:

$$0 \le p_{i,k}^{\text{ev,ch},n} \le \overline{p}^{\text{ev,ch},n} z_{i,k}^{\text{ev,ch},n} \tag{B10}$$

$$0 \le p_{i,k}^{\text{ev,dis},n} \le \overline{p}^{\text{ev,dis},n} z_{i,k}^{\text{ev,dis},n}$$
(B11)

$$z_{i,k}^{\text{ev,ch},n} + z_{i,k}^{\text{ev,dis},n} \le 1$$
(B12)

$$E_{i,k}^{\text{ev},n} = E_{i,k-1}^{\text{ev},n} + \sum_{k_{ar}^{i}}^{k} \eta p_{i,k}^{\text{ev,ch},n} \Delta T_2 - \sum_{k_{ar}^{i}}^{k} \frac{p_{i,k}^{\text{ev,dis},n} \Delta T_2}{\eta}$$
(B13)

$$\underline{\underline{E}}^{\text{ev},n} \leq \underline{E}^{\text{ev},\text{lea},n}_{i\,k} \leq \underline{E}^{\text{ev},n}_{i\,k} \leq \overline{\underline{E}}^{\text{ev},n} \tag{B14}$$

$$E_{i\,k}^{\text{ev,lea},n} \ge E_{i\,k}^{\text{ev,end},n} - \overline{p}^{\text{ev,ch},n} (k_{\text{lea}}^i - k) \tag{B15}$$

式中: $p_{i,k}^{\text{ev,ch,n}}$ 、 $p_{i,k}^{\text{ev,dis,n}}$ 分别为停靠在充电桩的第*n*台充电汽车在*k*时刻的充电功率、放电功率;二进制整数变量 $z_{i,k}^{\text{ev,ch,n}}$ 、 $z_{i,k}^{\text{ev,dis,n}}$ 分别为充电、放电状态指标; $E_{i,k}^{\text{ev,n}}$ 为第*n*台电动汽车在*k*时刻的充电状态; $\overline{p}^{\text{ev,ch,n}}$ 、 $\overline{p}^{\text{ev,ch,n}}$ 、 $z_{i,k}^{\text{ev,dis,n}}$ 分别为充电功率极限、放电功率极限; $\overline{E}^{\text{ev,n}}$ 、 $\underline{E}^{\text{ev,n}}$ 分别为充电状态上限、下限; η 为充放电效率系数; $\Delta T_2 = 15$ min 为电动汽车离散时间间隔; k_{arr}^i 、 k_{lea}^i 分别为第*n*台电动汽车的到达充电桩时间、离开充电桩时间; $E_{i,k}^{\text{ev,end,n}}$ 为电动汽车离去时的目标充电状态; $E_{i,k}^{\text{ev,lea,n}}$ 为由离去时间限制的*k*时刻的最小充电状态。当 $z_{i,k}^{\text{ev,ch,n}}$ 为1时,表示正处于充电状态,当 $z_{i,k}^{\text{ev,dis,n}}$ 为1时,表示正处于放电状态,式(B12)保证储能不能同时充放电。约束式(B14)、(B15)为保证电动汽车在离去时,充电状态不小于用户设定的目标充电状态。

Table C1 Correspondence between compact form of matrix and specific constraints					
矩阵紧凑形式	对应的具体式子				
су	$-(\alpha \overline{P}_{1}^{AGG} - \beta \underline{P}_{1}^{AGG}) - (\alpha \overline{P}_{2}^{AGG} - \beta \underline{P}_{2}^{AGG}) - (\alpha \overline{P}_{3}^{AGG} - \beta \underline{P}_{3}^{AGG}) - (\alpha \overline{P}_{4}^{AGG} - \beta \underline{P}_{4}^{AGG})$				
dx	$M \sum_{i,k} (v^+_{i,k} + v^{i,k})$				
$Ay \ge b$	$Q_{y} = \{y \mid 约束式(1), (2)\}$				
$Fu \ge h$	$ ilde{\Omega}^{ ext{D}}(y) = \{u \mid$ 约束式(5)}				
$Ex + Gz \ge f - Ru$	$Q_x(y,u) = \{x, z \mid 约束式(6) - (9), (B1) - (B15)\}$				

防录 C 表 C1 矩阵紧凑形式和具体约束的对应关系

附录 D

变形前的含 DDU 的鲁棒评估模型如式(D1)-(D4)所示。

$$\min_{y \in \Omega_{y}} \{ cy + \max_{u \in \tilde{\Omega}^{D}(y)} \min_{x \in \Omega_{x}(y,u)} dx \}$$
(D1)

s.t.:
$$Ay \ge b$$
 (D2)

$$Fu \ge h + Ky \tag{D3}$$

$$Ex + Gz \ge f - Ru \tag{D4}$$

约束式(D3)构成了 DDU (即 $\tilde{\Omega}^{p}$),导致该问题求解困难,需将受y决策影响的约束式(D3)转换为普通的定范围不确定性集。

本文对式(D3)的不确定集范围进行标幺化,使转换后的不确定性参数 μ 在[0,1]^p上取值,p为 μ 的维度。此处以p=4为例进行推导。

从约束式(5)可知, u和µ的关系可表达如下:

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{1}^{\text{sys}} \\ \boldsymbol{P}_{2}^{\text{sys}} \\ \boldsymbol{P}_{3}^{\text{sys}} \\ \boldsymbol{P}_{4}^{\text{sys}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{P}_{1}^{\text{AGG}} + \mu_{1}(\overline{P}_{1}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{1}^{\text{AGG}}) \\ \underline{P}_{2}^{\text{AGG}} + \mu_{2}(\overline{P}_{2}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{2}^{\text{AGG}}) \\ \underline{P}_{3}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{3}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{3}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{3}^{\text{AGG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{P}_{1}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{2}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{3}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{P}_{1}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{2}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} \\ \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{1}^{\mu_{1}}(\overline{P}_{1}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \\ \mu_{2}(\overline{P}_{2}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \\ \mu_{3}(\overline{P}_{3}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P}_{1}^{\mu_{1}}(\overline{P}_{1}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P}_{1}^{\mu_{1}}(\overline{P}_{1}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\text{AGG}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P}_{1}^{\mu_{1}}(\overline{P}_{1}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P}_{1}^{\mu_{1}}(\overline{P}_{1}^{\mu_{1}} - \underline{P}_{1}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\text{AGG}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P}_{1}^{\mu_{1}}(\overline{P}_{4}^{\mu_{1}} - \underline{P}_{4}^{\mu_{1}}) \\ \mu_{4}(\overline{P}_{4}^{\mu_{1}} - \underline{P}_{4$$

$$Dy + \operatorname{diag}(\mu)Ly = (D + \operatorname{diag}(\mu)L)y$$

将上式代入式(D1)-(D4),可得:

$\min\{cy + n\}$	nax min	dx	(D5)
$y \in \Omega_y$ μ	$\in \tilde{\Omega}^{d} x \in \Omega_{x}(y, \mu)$)	~ /

s.t.:
$$Ay \ge b$$
 (D6)

$$F \mu \ge h \tag{D7}$$

$$Ex + Gz \ge f - R(D + \operatorname{diag}(\mu)L)y$$
(D8)

式(D7)为[0,1]⁴的定常不确定性集,表示为 $\tilde{\Omega}^{d}$,从而实现了将含 DDU 的鲁棒优化问题转化为普通的鲁棒优化问题。

嵌套 C&CG 算法的外层问题与经典 C&CG 算法完全相同,而内层问题是一个混合整数规划问题, 通过等价变化,将内层转化为一个新的 C&CG 流程,即包含了一层 C&CG 流程,故称为嵌套 C&CG 算 法。文献[22]证明,对于整数变量可数的情况下,内层 C&CG 算法可以在有限次内收敛。

E.1 主问题 MP: 外层的 C&CG 算法

首先,忽略整数变量的存在,根据 C&CG 算法可以将问题(13)分解为如下主问题(MP)和子问题(SP) 相互迭代的求解结构:

$$\begin{cases} (MP) \min_{y,\eta,x} cy + \eta \\ \text{s.t.} \quad Ay \ge b \\ \eta \ge dx_l \qquad (E1) \\ Ex_l + Gz_l \ge f - R(D + \operatorname{diag}(u_l^*)L)y \\ \eta \in \mathbf{R}, x_l \in \mathbf{R}_+^p, z_l \in \mathbf{B}^q, \forall 1 \le l \le k \end{cases}$$
$$\begin{cases} (SP) \ Q(y) = \max_{u \in U} \min_{z,x} dx \\ \text{s.t.} \quad Ex + Gz \ge f - R(D + \operatorname{diag}(u)L)y \\ x \in \mathbf{R}_+^p, z \in \mathbf{B}^q \end{cases}$$
(E2)

式中: k为迭代次数,初始时k=0; **R**为实数集; **R**₊^p为p维的非负实数集,其中p为 x_i 的维数; **B**^q为q维的二进制数集,其中q为 z_i 的维数; **U**表示不确定性变量集合。

在普通 C&CG 算法中,求解 MP 问题,得到第 k次 MP 问题的最优解(y_{k+1}^*, η_{k+1}^*)。随后,令 SP 问题 求解 $Q(y_{k+1}^*)$,得到第 k次 SP 问题的最优解的 u_{k+1}^* ,新增变量 x_{k+1} 、 π_{k+1} 及与参数 u_{k+1}^* 相关的一系列约束 至 MP。在每次求解过程中更新上界和下界的值,反复迭代,直至满足收敛判据,此时,便得到了整个 问题的最优解。

然而,问题式(13)分解的 SP 问题是两阶段的混合整数问题,直接求解比较困难。嵌套 C&CG 算法 将子问题 SP 重新构造,进一步将子问题分解为子问题的主问题和子问题的子问题,再次套用 C&CG 算 法求解,即将子问题的 C&CG 算法"嵌套"在了整个问题的 C&CG 算法中。在下一小节将详细介绍内层的 C&CG 算法求解子问题的原理。

E.2 子问题 SP: 内层的 C&CG 算法

对于 SP 问题中的整数变量 z, 假设整数变量 z 是可计数的,并且是可穷举的(假设为 R 个), 即整数变量可表示为 $\boldsymbol{\sigma} = \{z^r | z \in \mathbf{B}^q\}_{r=1}^{R}$ 集合,那么如果能对每一个整数变量 z 所对应的 SP 问题(固定 z 后 SP 是一个易解的线性规划问题)都进行求解,自然地就可以求得 SP 的最优解。因此, SP 问题等价为:

$$\begin{cases} Q(\hat{y}) = \max_{u \in U} \theta \\ \text{s.t.} \quad \theta \le \min_{x_r} \{ dx_r : Ex_r + Gz_r \ge f - R(D + \operatorname{diag}(u)L)\hat{y} \} \\ r = 1, ..., R \end{cases}$$
(E3)

借助 KKT 条件可将上式转化为 SP1 问题:

$$(SP1) Q(\hat{y}) = \max \theta$$
s.t. $\theta \le dx_r$

$$Ex_r + Gz_r^* \ge f - R(D + \operatorname{diag}(u)L)\hat{y}$$

$$E^{\mathrm{T}}\pi_r \le d^{\mathrm{T}}$$

$$x_r(d^{\mathrm{T}} - E^{\mathrm{T}}\pi_r) = 0$$

$$\pi_r(Ex_r + Gz_r^* - f + R(D + \operatorname{diag}(u)L)\hat{y}) = 0$$

$$u \in U, x_r \in \mathbb{R}^p_+, z_r \in \mathbb{R}^q, \pi_r \in \mathbb{R}^{p'}_+, 1 \le r \le k'$$

$$(E4)$$

式中: k'为子问题的迭代次数,表示增加至 SP1 问题的整数变量个数,初始时k'=0; π_r 为第r个整数 变量对应最小化问题的对偶变量。

求解 SP1,便可得到 MP 需要的最优解 $u_{k'+1}^*$ 。

但是通常整数变量 z 是难以穷举的, 计算成本高昂。借鉴 C&CG 算法流程, 可以通过求解下面的 SP2 问题快速得到对 SP1 问题起作用的整数变量:

$$(SP2) \min_{x,z} dx s.t. \quad Ex + Gz \ge f - R(D + \operatorname{diag}(u_{k'+1}^*)L)\hat{y}$$

$$x \in \mathbf{R}_+^p, z \in \mathbf{B}^q$$

$$(E5)$$

通过求解 SP2,得到最优解 $z_{k'+1}^*$,由 $z_{k'+1}^*$ 生成 SP1 问题的新增约束和 $z_{k'+1}^*$ 一起添加至 SP1,避免穷举整数变量的问题,快速获得子问题的解。

至此, SP1 问题和 SP2 问题便组成了内层的 C&CG 算法结构。通过 SP1 问题和 SP2 问题相互迭代, 直至满足精度,此时便完成了 SP 问题的求解,并将 SP 问题的最优解 u_{k+1}^* 传递给 u_{k+1}^* ,返回 MP 问题, 继续进行外层 C&CG 算法的流程。

附录 F FLVPP 的内部拓扑如图 F1 所示。仿真中温控负荷的参数设置如表 F1 所示。



表 F1 仿真中温控负荷的参数设置

设备	数目	额定功率/kW	热容/(kW ・ h ・℃ ⁻¹)	热阻/(℃・kW ⁻¹)	转换效率
空调	40	2.5-3.6	1.5-2.5	1.5-2.5	2.5
电暖炕	60	4.5-6.5	1.5-2.5	1.5-2.5	2.5

温控负荷在 07:00—10:00 间陆续打开,在 17:00—20:00 间陆续关闭,温控负荷的开启和关闭时序如 图 F2 所示,电动汽车有相近的启停特性。



Fig.F2 State sequence of thermostatically controlled loads

附录 G

下面给出仿真中所使用的典型算例的迭代次数和主问题的上下界变化趋势。

其中 Case G1 中包含 100 个温控负荷、2 个储能设备和 4 个电动汽车充电桩, Case G2 中包含 100 个 温控负荷、2 个储能设备和 2 个电动汽车充电桩。

表 G1 Case G1 的迭代次数和主问题的上下界

Table G1 Number of iterations and upper and lower bounds of master problem in Case G1

迭代次数	1	2	3	4
上界	$\infty +$	4.2609×10^{6}	5.7909×10^5	-910.53
下界	-∞	-1200	-910.53	-910.53

表 G2 Case G2 的迭代次数和主问题的上下界

Table G2 Number of iterations and upper and lower bounds of master problem in Case G2

迭代次数	1	2	3	4	5
上界	$+\infty$	8.3188×10 ⁶	4.8874×10 ⁶	8.7960×10 ⁵	-295.65
下界	-∞	-1200	-640	-355.65	-295.65

从表 G1 和表 G2 中可以清晰地看出嵌套 C&CG 算法应用于本文模型的上下界可以在较少的迭代次数内收敛。