

# 考虑电网辅助服务的分布式能源 聚合体优化方法

吴问足<sup>1</sup>, 赵玉柱<sup>1</sup>, 刘国伟<sup>2</sup>, 吕倩<sup>2</sup>, 丁大洋<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510530; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 分布式能源个体一般无法直接参与电力市场交易或提供电网辅助服务, 这可以通过分布式能源聚合来解决。在多能源类型、多交易市场及多服务基础上, 提出一种新的分布式能源聚合体优化方法, 该方法分为一级、二级、三级 3 个阶段的优化。首先, 一级优化中使用了线性化技术来克服聚合体跨时空调度问题的非凸性, 并将问题转换成混合整数线性规划问题, 得出日前机组组合方案; 其次, 二级优化中基于一级优化给出的机组组合方案并使用最优潮流方程的二阶锥凸松弛求解经济调度问题以获得节点电压和功率流; 然后, 在三级优化中对偏离二级优化设定点进行惩罚, 使三级优化接近系统最佳运行点, 同时具有较短的规划范围; 最后, 在案例研究中将优化方法应用于一个包含电解制氢、风力发电及光伏发电等多能源聚合体模型。测试结果表明: 所提出方法在电网辅助服务支持和聚合体灵活性增强方面的优势, 并以最大限度增加运营收益, 证明所提方法的有效性。

**关键词:** 分布式能源聚合体; 辅助服务; 智能电网; 无功功率; 机组组合

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.022 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)04-0205-09

## Research on the optimization method of distributed energy polymer considering grid ancillary services

WU Wenzu<sup>1</sup>, ZHAO Yuzhu<sup>1</sup>, LIU Guowei<sup>2</sup>, LÜ Qian<sup>2</sup>, DING Dayang<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Power Dispatching Control Center, Guangdong 510530, China; 2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, China)

**Abstract:** Distributed energy individuals generally cannot directly participate in electricity market transactions or provide grid auxiliary services. This issue can be solved through distributed energy aggregation. This paper proposes a new distributed energy polymer optimization method based on multiple energy types, multiple trading markets, and multiple services. The optimization method can be divided into three stages: high-level, middle-level, and low-level optimization. First, in the high-level optimization, linearization techniques are used to overcome the non-convexity of the cross spatiotemporal scheduling problem of aggregates, and the problem is transformed into a mixed integer linear programming problem to obtain the day-ahead unit combination scheme. Based on the unit combination scheme, the middle-level optimization solves the economic dispatch problem by the second-order cone-convex relaxation of the optimal power flow equation to obtain the node voltage and power flow. Deviations from the middle-level optimization set point are then penalized in the low-level optimization, making the results of the low-level optimization get close to the system optimal

收稿日期: 2022-09-18; 修回日期: 2022-12-16

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(0000002021030101XT00066)

通信作者: 吴问足(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力市场建设、电力系统调度控制研究; E-mail: nfdwlgxz@163.com

operating point while having a shorter planning horizon. Finally, in a case study, the optimization method is applied to a multi-energy polymer model including electrolytic hydrogen production, wind power generation, photovoltaic power generation, etc. The results show the advantages of the proposed method in terms of grid ancillary service and aggregate flexibility enhancement. The operational benefits are maximized, which validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** distributed energy polymer; auxiliary services; smart grid; reactive power; unit commitment

近年来,接入智能电网的分布式能源数量越来越多,可再生能源发电规模也在增大。目前一些接入电网的分布式能源规模太小,无法直接参与电力市场交易。如果没有适当的控制,这些分布式能源可能会导致电网电压和功率流波动问题,并且由于电网的输送能力受限而不能被充分利用<sup>[1]</sup>。通过控制和协调方法,分布式能源聚合体可以参与电力市场并提供电网辅助服务<sup>[2-3]</sup>。

文献中讨论的分布式能源聚合技术在构成和范围上各不相同,其中最简单的只考虑了负荷转移、可再生能源发电和电储能<sup>[4]</sup>。文献[5]通过考虑满足热、电负荷来扩大分布式能源聚合体的收益;文献[6]提出了一个结合所有上述特征的分布式能源聚合体模型,同时提供频率控制辅助服务(frequency control auxiliary services, FCAS);文献[7]强调这种参与多个市场和提供辅助服务的方式是分布式能源聚合技术进行可持续商业应用的关键。

在研究分布式能源聚合技术性能的同时,还应该研究其财务影响。上述模型没有考虑分布式能源整合对本地电网的相关支持,但这是分布式能源运营商额外收入来源之一。文献[8]表明储能系统可为电网提供调峰服务,以处理电力设备过载并实现能源时空套利,但文献中的模型只考虑了线路拥堵,而忽略了本地电压支持;文献[9]中的分布式能源聚合体参与了日前的能源市场,并通过主动控制向电网提供线路拥堵缓解服务,但分布式能源聚合体提供的服务依靠的是系统运营商的控制指令,而不是线路拥堵情况,无法充分调动聚合体的参与积极性;文献[10]中光伏和储能在确保满足电压和功率流约束的情况下聚合提供辅助服务,并且不需要系统运营商的指令,但文献没有研究分布式能源聚合体参与多个市场的能力,所以不能完全反映提供辅助服务对分布式能源聚合体收入的影响;文献[11]提出的分布式能源聚合体模型参与了多个市场(能源批发和储备市场),同时确保不违反本地电

压和热负荷约束,但此模型只适用于日前市场投标,而且涉及到非凸性优化,考虑到系统模型的不确定性,其实用性较低;文献[12]提出了一种考虑不确定性的分布式能源聚合体模型,但此模型只参与了电力批发市场,忽略了遵守本地电网约束的成本;此外,分布式能源聚合体的出价不灵活,这影响其在投标窗口较短的市场的盈利能力;文献[13]提出了一种允许较短出价间隔的聚合体模型,该模型考虑了负荷和可再生能源发电的不确定性,但这项工作既没有考虑本地电网支持的成本,也没有考虑多市场参与的潜在收入来源。

利用多种能源可以为分布式能源聚合体提供额外的灵活性。如:文献[14]考虑了热能和电能;考虑到市场价格的不确定性,文献[15]为参与FCAS和能源批发市场的多能源系统提出了一种两阶段优化算法;文献[16]为提供多种服务的多能源分布式能源聚合体提出了一种确定性的建模方法,但是该工作忽略了对电网中的不确定性和提供本地网络电压支持的成本<sup>[17]</sup>。

鉴于上述情况,本文提出一个多阶段分布式能源聚合体优化方法,结合不确定条件下的滚动窗口,旨在参与多个市场,同时也提供辅助服务。将优化过程分解为3个顺序协调的优化问题,涉及不同的时间尺度,确保问题的可处理性,同时考虑模型的不确定性和网络约束。使用潮流方程的二阶锥松弛,以更准确地表示电网运行特性。此外,对分布式能源聚合体参与多个辅助服务市场进行经济分析,以确定所提方法的实际性能。

## 1 分布式能源聚合体优化方法

### 1.1 优化框架

所提出的方法旨在市场价格、网络负载和分布式能源产量不确定的情况下,调度能源以实现同时参与多个市场的最大利润,同时提供辅助服务和本

地网络支持。所提出的方法允许对聚合体中的资源进行日前调度。

为了最大限度地利用聚合体在竞价窗口较短的能源市场中的灵活性,该方法还支持5 min调度。需要面对的问题包含多周期的整数变量(储能资源)、非线性(网络方程)和机会约束(不确定性)等多方面复杂性,因此难以求解和扩展。将所提出的方法分解为3个顺序协调的优化问题,如图1所示。

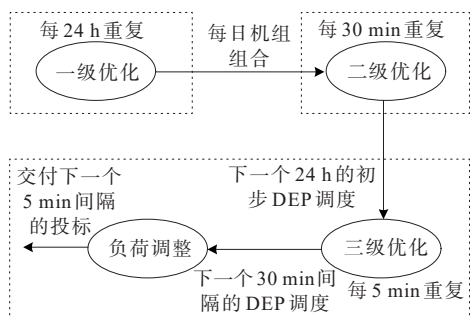


图1 三阶优化流程

Figure 1 Three-stage optimization process

一级优化是基于场景的鲁棒混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP),求解日前机组组合。在2个状态相关的24 h预测范围内,以30 min的时间步长生成48 h机组组合计划,其中前24 h计划具有约束力。二级优化在给定48 h周期的前24 h,以30 min间隔滚动窗口对资源进行调度。三级优化在30 min预测范围内进行5 min间隔的滚动优化。

通过上述3个协调优化来管理整个问题的关键方面。由于机组组合问题最容易采用二进制变量编码,因此,在一级优化中使用网络功率流约束的线性化求解易于处理的MILP问题。在二、三级优化中使用功率流方程更准确的凸松弛。另一个需要考量的是求解问题的大小,二级优化具有5 min时间步长和24 h计划范围。虽然二级优化问题是凸的,但标准求解器的求解时间和内存要求可能会随着问题大小的增加而不利扩展,从而促使其额外拆分为三级优化问题。

如上所述,与网络的交流功率流方程相关的非凸约束可通过线性化或凸松弛来近似。在构建日前机组组合时,不必非常准确地表示功率流,可以使用线性近似。然而,线性化并不能为聚合体提供

足够的精度来有效地提供本地网络支持服务。因此,在二、三级问题中调度资源时,使用了凸松弛,特别是二阶锥松弛。该松弛假定三相平衡运行,以及用不等式代替与功率和电压相关的等式,忽略了回路周围电压的相量和(使用电压和电流的平方作为凸化约束所需的决策变量)。

在48 h(其中只有前24 h受约束)内能源调度状态从一级优化传递到二级优化;二级优化调度计划每30 min从二级优化传递到三级优化;三级优化在每次优化时将聚合体的当前运行状态传递给一、二级优化。三级优化调度交流潮流以确定提供市场运营商的准确报价。

一级优化问题本质上是一个随机机组组合问题,具有反映负载和分布式能源发电不确定性的机会约束。一般来说,机会约束优化很难解决,可以采用基于场景的近似方法,将机会约束以潜在概率分布中提取的有限数量的约束实现(场景)所取代。场景近似法的一个优点是其不依赖于不确定变量的特定分布,因此,将一级优化问题直接表述为随机机组组合问题的场景近似。为了获得对近似质量的保证,通常需要大量场景,这会使近似问题变得难以求解。然而,在具有线性化潮流约束的机组组合背景下,可以利用问题结构来构造一个约束,该约束要小得多,易于处理。

三级优化问题的滚动优化定期更新调度情况,以响应观察到的需求、分布式能源输出和市场价格。三级优化基于3种场景:预期、发电过剩和发电不足场景。这有助于确保在某种程度上对约束可行性方面的扰动不敏感的易处理性和结果。这同样适用于二级优化问题。如果希望减轻短期/中期风险影响,则可以通过选择适当的场景来调整。可以在文献[18]中找到场景构建方法的详细信息。

## 1.2 三阶优化方法

### 1) 一级优化。

一级优化问题的目标函数为

$$\min \sum_{s=1}^{S^{\text{ml}}} \pi_s \sum_{t=1}^T c_s^{\text{tot}}(t) \Delta t \quad (1)$$

式中, $S^{\text{ml}}$ 为一级优化阶段考虑的场景数; $s$ 为场景标签; $t$ 为时间标签; $\pi_s$ 为第 $s$ 个场景发生的概率; $c_s^{\text{tot}}$ 为第 $s$ 个场景下的系统总成本; $\Delta t$ 为优化问题时间步长,一级优化阶段为0.5 h。

$$c_s^{\text{tot}}(t) = \lambda_{s,t}^{\text{P}} p_s^{\text{ext}}(t) + \lambda_{s,t}^{\text{Q}} q_s^{\text{ext}}(t) + c_s^{\text{op}}(t) - \lambda_{s,t}^{\text{H}_2} \cdot p_{k,s}^{\text{H}_2}(t) + \sum_{k \in \Psi} (\lambda_k^{\text{curt}} \omega_{k,s}(t) - \lambda_{s,t}^{\text{Raise}} p_{k,s}^{\text{Raise}}(t) - \lambda_{s,t}^{\text{Low}} p_{k,s}^{\text{Low}}(t) - \lambda_{s,t}^{\text{FFR}} (p_{k,s}^{\text{FFR}}(t) - \underline{P}_t^{\text{FFR}})) \quad (2)$$

$$c_s^{\text{op}}(t) \geq \sum_{k \in \Psi} (\chi_k^{\text{g}} p_{k,s}^{\text{g}}(t) + \chi_k^{\text{l}} p_{k,s}^{\text{l}}(t) + \gamma_k \zeta_k(t)) + \frac{\lambda_k^{\text{on}}}{\Delta t} \max(0, \zeta_k(t) - \zeta_k(t-1)) + \frac{\lambda_k^{\text{off}}}{\Delta t} \max(0, \zeta_k(t-1) - \zeta_k(t)) \quad (3)$$

式(2)、(3)中,  $\lambda_{s,t}^{\text{P}}$  为有功功率市场价格;  $p_s^{\text{ext}}$  为从电网输入的有功功率;  $\lambda_{s,t}^{\text{Q}}$  为无功功率市场价格;  $q_s^{\text{ext}}$  为从电网输入的无功功率;  $c_s^{\text{op}}$  为分布式能源聚合体的运行成本;  $\lambda_{s,t}^{\text{H}_2}$  为氢气销售价格;  $p_{k,s}^{\text{H}_2}(t)$  为氢气销售功率;  $\lambda_k^{\text{curt}}$  为负荷削减价格;  $\omega_{k,s}$  为负荷削减量;  $\lambda_{s,t}^{\text{Raise}}$  为频率提升服务价格;  $\lambda_{s,t}^{\text{Low}}$  为频率降低服务价格;  $p_{k,s}^{\text{Raise}}$  为频率提升所需功率;  $p_{k,s}^{\text{Low}}$  为频率降低所需功率;  $\lambda_{s,t}^{\text{FFR}}$  为快速频率响应市场价格;  $p_{k,s}^{\text{FFR}}$  为快速频率响应供应功率;  $\zeta_k$  为机组组合状态;  $\chi_k^{\text{g}}$  为线性运营成本系数;  $p_{k,s}^{\text{g}}$  为分布式能源有功发电量/负载; 上标 l/g 分别为负荷/发电, 下划线表示变量下限(上划线表示变量上限);  $\chi_k^{\text{l/g}}$  为负荷/发电运营成本系数;  $p_{k,s}^{\text{l/g}}$  为分布式能源发电/负荷有功功率;  $\gamma_k$  为运营成本常数;  $\lambda_k^{\text{on}}$  为启用分布式能源机组价格;  $\lambda_k^{\text{off}}$  为关闭分布式能源机组价格。

式(2)中系统成本由8项组成: 第1、2项分别代表从电网购买有功和无功功率成本, 第3项代表调度资源的成本, 第4项代表氢气销售收入, 第5项代表负荷削减成本, 第6~8项分别代表调频辅助服务收入。

一级优化问题包括以下线性化潮流约束:

$$|p_{b,s}(t)| + |q_{b,s}(t)| \leq \sqrt{2} \bar{S}_b \quad (4)$$

$$[|p_{b,s}(t)|, |q_{b,s}(t)|] \leq [\bar{S}_b, \bar{S}_b] \quad (5)$$

$$[p_{b,s}(t) + p_{\bar{b},s}(t), q_{b,s}(t) + q_{\bar{b},s}(t)] = [0, 0] \quad (6)$$

$$\underline{V}_{n,t} \leq |v_{n,s}(t)| \leq \bar{V}_{n,t} \quad (7)$$

$$\underline{\theta}_n \leq \theta_{n,s}(t) \leq \bar{\theta}_n \quad (8)$$

$$p_{b,s}(t) = G_{b,t} (|v_{n_s^+}(t)| - |v_{n_s}(t)|) - B_{b,t} (\theta_{n_s^+}(t) - \theta_{n_s}(t)) \quad (9)$$

$$q_{b,s}(t) = -B_{b,t} (|v_{n_s^+}(t)| - |v_{n_s}(t)|) - G_{b,t} (\theta_{n_s^+}(t) - \theta_{n_s}(t)) \quad (10)$$

$$\sum_{b \in \Psi^n} [p_{b,s}(t), q_{b,s}(t)] = \sum_{k \in \Psi^n} [p_{k,s}(t), q_{k,s}(t)] \quad (11)$$

式(4)~(11)中, 下标  $b$  为集合  $\Psi^{\text{B}}$  中网络的线路标签,  $k$  为分布式能源集合  $\Psi^{\text{K}}$  中的能源标签,  $n$  为电网节点标签;  $p_{b,s}$  为线路注入有功功率;  $q_{b,s}$  为线路注入无功功率;  $\bar{S}_b$  为线路视在功率上限;  $p_{\bar{b},s}$  为线路流出有功功率;  $q_{\bar{b},s}$  为线路流出无功功率;  $v_{n,s}$  为节点电压;  $\theta_{n,s}$  为节点电压角;  $G_{b,t}$  为线路电导; 下标  $n_b^+$ 、 $n_b^-$  分别为线路高压、低压侧;  $B_{b,t}$  为线路电纳;  $p_{k,s}$  为分布式能源有功注入;  $q_{k,s}$  为分布式能源无功注入。

式(4)~(6)中定义了有功、无功和视在功率之间非线性关系的线性近似约束; 式(11)确保由分布式能源注入节点的有功/无功功率与流出节点的功率匹配; 公共耦合点是系统中的松弛母线。在文献[14]的基础上, 一级优化问题还需考虑以下约束:

$$\sum_{j=t}^{t+U_i-1} \zeta_k(j) \geq U_i (\zeta_k(t) - \zeta_k(t-1)) \quad (12)$$

$$\sum_{j=t}^{t+D_i-1} (1 - \zeta_k(j)) \geq D_i (\zeta_k(t-1) - \zeta_k(t)) \quad (13)$$

$$E_k (x_{k,s}(t+1) - x_{k,s}(t)) = (\eta_k^{\text{l}} p_{k,s}^{\text{l}}(t) - p_{k,s}^{\text{g}}(t) / \eta_k^{\text{g}} + \epsilon_{k,s,t} - \omega_{k,s}(t) - v_k) \Delta t \quad (14)$$

$$\zeta_k(t) \underline{P}_k^{\text{g}/1} \leq p_{k,s}^{\text{g}/1}(t) \leq \zeta_k(t) \bar{P}_k^{\text{g}/1} \quad (15)$$

$$\zeta_k(t) \underline{Q}_k \leq q_{k,s}(t) \leq \zeta_k(t) \bar{Q}_k \quad (16)$$

$$p_{k,s}(t) = p_{k,s}^{\text{g}}(t) - p_{k,s}^{\text{l}}(t) \quad (17)$$

$$-\underline{P}_k^{\text{g}/1} (1 - \zeta_k(t)) + \underline{\rho}_k \Delta t \leq p_{k,s}^{\text{g}/1}(t) - p_{k,s}^{\text{g}/1}(t-1) \leq \bar{\rho}_k \Delta t + \bar{P}_k^{\text{g}/1} (1 - \zeta_k(t-1)) \quad (18)$$

$$0 \leq x_{k,s}(t) \leq 1 \quad (19)$$

$$X_k^{\text{target}} \leq x_{k,s}(T+1) \quad (20)$$

$$0 \leq \Phi_k^{\epsilon} \omega_{k,s}(t) \quad (21)$$

$$0 \leq \alpha_k |\epsilon_{k,s,t}| - |\omega_{k,s}(t)| \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T |\omega_{k,s}(t)| \leq \beta_k \sum_{t=1}^T |\epsilon_{k,s,t}| \quad (23)$$

$$[0, 0] \leq [p_{k,s}^{\text{Raise}}(t), p_{k,s}^{\text{Low}}(t)] \leq [\bar{\rho}_k \sigma^{\text{Raise}}, -\underline{\rho}_k \sigma^{\text{Low}}] \quad (24)$$

$$\zeta_k(t) \bar{P}_k^{\text{g}} \geq p_{k,s}(t) + \max(p_{k,s}^{\text{Raise}}(t)) + p_{k,s}^{\text{FFR}}(t) \quad (25)$$

$$-\zeta_k(t) \bar{P}_k^{\text{l}} \leq p_{k,s}(t) - \max(p_{k,s}^{\text{Low}}(t)) \quad (26)$$

$$-\zeta_k(t) \bar{P}_k^{\text{l}} \leq p_{k,s}(t) - \max(p_{k,s}^{\text{Low}}(t)) \quad (27)$$

$$E_k x_{k,s}(t) \geq \frac{1}{\eta_k^g} (p_{k,s}^1(t) \Delta t + p_{k,s}^{\text{Raise}}(t) \cdot \tau^{\text{Raise}}) \quad (28)$$

$$E_k(1 - x_{k,s}(t)) \geq \eta_k^l (p_{k,s}^1(t) \Delta t + p_{k,s}^{\text{Low}}(t) \cdot \tau^{\text{Low}}) \quad (29)$$

式(12)~(29)中,  $U_k$  为分布式能源最短运行时间;  $D_k$  为分布式能源最短停机时间;  $E_k$  为分布式能源储能能力;  $x_{k,s}$  为归一化储能;  $\eta_k^l$  为负荷转换效率;  $p_{k,s}^1$  为有功负载;  $p_{k,s}^g$  为有功发电;  $\eta_k^g$  为发电转换效率;  $\epsilon_{k,s,t}$  为分布式能源可用发电功率;  $v_k$  为储能损失;  $X_k^{\text{target}}$  为分布式能源目标在最后一个时间步长的存储能量;  $\alpha_k$  为每个时间步长的负载缩减系数;  $\beta_k$  为周期内的负载缩减系数;  $\rho_k$  为分布式能源爬坡率;  $\sigma^{\text{Raise}}$  为升频服务响应时间;  $\sigma^{\text{Low}}$  为降频服务响应时间;  $\tau^{\text{Raise}}$  为升频服务持续时间;  $\tau^{\text{Low}}$  为降频服务持续时间。

式(12)、(13)对启停机进行了约束,式(14)则考虑了系统储能设备的通用约束,机组所能提供的有功和无功功率受式(15)~(21)的约束,式(22)~(24)分别限制了每个时间步长和整个规划范围内的负荷允许削减量。式(25)~(29)则考虑了设备的最大爬坡能力和调频服务时间。本文中的调频辅助服务特指在频率发生重大变化时使用的应急调频,响应时间是指在请求调频服务后,供应商必须达到其投标功率输出的时间<sup>[19]</sup>。引入约束条件式(25)是为了确保设备有足够的功率余量来提供服务。一级优化问题决策变量如式(2)所示。

## 2) 二级优化。

基于场景的二级优化与一级优化的主要区别在于:二级优化不是进行机组组合优化,而是经济调度优化。因此,它不包含整数变量,可使用二阶锥优化。二级优化问题的目标函数依然为式(1),但运行成本更新如下:

$$c_s^{\text{op}}(t) \geq \sum_{k \in \Psi^k} \left( \kappa_k^g (p_{k,s}^g(t))^2 + \kappa_k^l (p_{k,s}^l(t))^2 + \chi_k^g p_{k,s}^g(t) + \chi_k^l p_{k,s}^l(t) + \gamma_k \zeta_{k,t} + \lambda_k^{\text{on}} \max(0, \zeta_{k,t} - \zeta_{k,t-1}) + \lambda_k^{\text{off}} \max(0, \zeta_{k,t} - \zeta_{k,t-1}) \right) \quad (30)$$

式中,  $\kappa_k^g$ 、 $\kappa_k^l$  为运营成本二次系数。

式(30)右侧是一个二次成本函数,其定义了一个凸约束,当  $c_s^{\text{op}}(t)$  出现在成本函数中并最小化时,该凸约束有效,否则不纳入该约束。一级问题中的

线性功率流约束式(4)~(10)在二级优化中由以下交流功率流约束的二阶锥松弛代替:

$$V_{n,t}^2 \leq v_{n,s}(t) \leq \bar{V}_{n,t}^2 \quad (31)$$

$$p_{b,s}(t) + p_{\bar{b},s}(t) = R_{b,t} i_{b,s}(t) \quad (32)$$

$$q_{b,s}(t) + q_{\bar{b},s}(t) = X_{b,t} i_{b,s}(t) \quad (33)$$

$$v_{n_{k,t}}(t) = v_{n_{k,t}}^+(t) - 2(R_{b,t} p_{b,s}(t) +$$

$$X_{b,t} q_{b,s}(t)) + (R_{b,t}^2 + X_{b,t}^2) i_{b,s}(t) \quad (34)$$

$$\bar{S}_b^2 \geq (p_{b,s}(t))^2 + (q_{b,s}(t))^2 \quad (35)$$

$$\bar{S}_k^2 \geq (p_{k,s}(t))^2 + (q_{k,s}(t))^2 \quad (36)$$

$$0 \leq \alpha_k^2 \epsilon_{k,s,t}^2 - \omega_{k,s}^2(t) \quad (37)$$

$$\sum_{t=1}^T \omega_{k,s}^2(t) \leq \beta_k^2 \sum_{t=1}^T \epsilon_{k,s,t}^2 \quad (38)$$

其中,  $R_{b,t}$  为线路电阻;  $X_{b,t}$  为线路电抗。

总之,当一级优化给定机组组合计划后,二级优化问题根据式(2)、(11)、(14)、(22)、(25)~(38),最小化式(1)以求解决策变量。

## 3) 三级优化。

基于场景的三级优化与二级优化相似,但其成本函数除外,成本函数在三级优化场景  $S^{\text{LI}}$  中最小化,并包括对偏离二级优化问题解决方案的惩罚项  $c_s^{\text{pen}}$ ,即

$$\min \sum_{s=1}^{S^{\text{LI}}} \pi_s \sum_{t=1}^T (c_s^{\text{tot}}(t) + c_s^{\text{pen}}(t)) \Delta t \quad (39)$$

$$c_s^{\text{pen}}(t) \geq \sum_{k \in \Psi^k} (\lambda_k^{\text{pen}_1} (p_{k,s}^1(t) - P_{k,t}^{\text{ref}})^2 +$$

$$\lambda_k^{\text{pen}_g} (p_{k,s}^g(t) - P_{k,t}^{\text{ref}})^2 + \lambda_k^{\text{pen}_s} (x_{k,s}(t) - X_{k,t}^{\text{ref}})^2) \quad (40)$$

式中,  $\lambda_k^{\text{pen}_1}$  为对偏离参考负荷的惩罚;  $\lambda_k^{\text{pen}_g}$  为对偏离参考有功功率的惩罚;  $\lambda_k^{\text{pen}_s}$  为对偏离参考储能的惩罚;  $P_{k,t}^{\text{ref}}$  为用于三级优化的参考负荷;  $P_{k,t}^{\text{ref}}$  为用于三级优化的参考有功功率;  $X_{k,t}^{\text{ref}}$  为用于三级优化的参考存储能量。

三级优化的约束条件为式(2)、(11)、(14)~(22)、(25)~(38)、(40)。修改后的目标函数式(39)旨在保持三级优化调度点和储能水平接近二级优化求解的最佳值,提供了对变化的市场或网络条件作出响应的自由,以获得财务激励。

## 2 案例研究

测试系统单线示意如图2所示,测试系统详细数据参见文献[20]。这个网络包含136 MW的风电

场、60 MW的太阳能发电场、73 MW的开放循环燃气轮机(open cycle gas turbine, OCGT)火力发电;负荷为90 MW,其中22.5 MW可削减;2个20 MW的电容器组、1个30 MW的电解制氢器、1个10 MW的氢气OCGT、1个5 MW的氢燃料电池以及1个100 MW·h容量的储氢器。

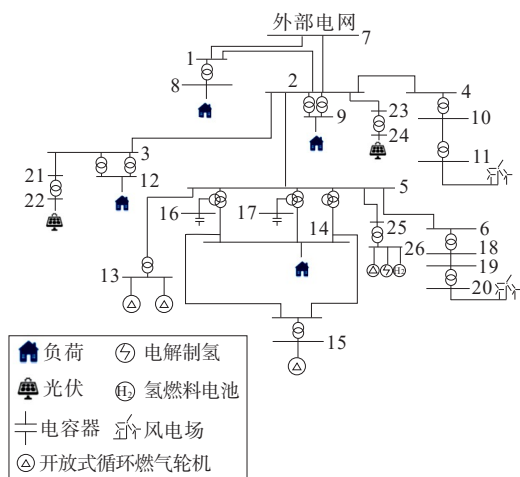


图2 测试系统单线示意

Figure 2 Single line diagram of test system

为了评估提供本地网络约束缓解的成本,该案例研究考虑了10个代表性日期。这些日期是每个季节有代表性的工作日和非工作日,以及1个极端高价日和1个极端低价日。案例研究基于文献[18]中风电场输出数据、能源和FCAS市场批发价格、太阳辐照度数据。假设氢气可以210元/(MW·h)的价格出售,削减负荷的成本为3 500元/(MW·h)。应急FCAS市场提供爬升和降低服务,进一步细分为快速(6 s内响应)、慢速(60 s内响应)和延迟(5 min内响应)服务。当提供本地网络支持服务时,电压保持0.95~1.05 p.u.,电网连接节点是一个松弛节点。

该模型在Matlab建立,用Yalmip作为解析器,用Gurobi来解决优化问题,仿真使用Core i7 @ 3.7 GHz计算机进行。对于所考虑的案例研究,一级优化包含 $4.005 \times 10^5$ 个变量和 $6.85 \times 10^5$ 个约束,在7~8 s内就能解决。二级优化考虑3种情况,包含 $2.01 \times 10^5$ 个变量和 $3.15 \times 10^5$ 个约束。解算器平均在95 s内找到这个问题的解决方案。三级优化考虑3种情况,包含 $2.55 \times 10^4$ 个变量和 $3.7 \times 10^4$ 个约束条件,并可在1 s内求解。这使得所提出的优化方法适合在现实的电网中实时实施。

## 2.1 分布式能源聚合体收入分析

对于典型的秋季工作日,存在1 350 MW·h的需求以及1 080 MW·h的可再生能源发电。能源市场的价格峰值为2 296元/(MW·h),平均价格为385元/(MW·h)。在典型的秋季工作日中,分布式能源聚合体的收入/成本一天中的变化如图3所示,对不断变化的市场价格和负荷需求/发电量作出反应,使整体利润最大化,同时提供本地电压支持。

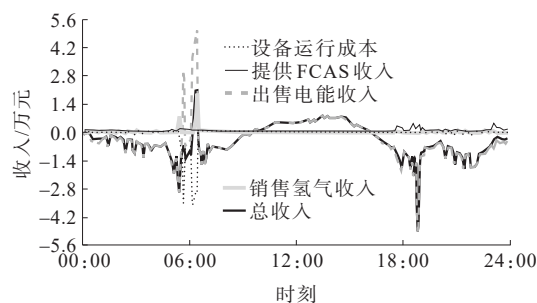


图3 分布式能源聚合体日收入情况

Figure 3 Daily income of distributed energy polymer

在一天的大部分时间里,可再生能源发电量少于负荷,因此,系统必须依赖电网进口能源或OCGT发电。然而,由于清晨的能源批发价格飙升,分布式能源聚合体设法减少其能源进口以降低成本,并在短暂的窗口期卖出能源以产生收入,通过氢气OCGT以及使用传统的热能OCGT,利用储存的氢气来产生能源。使用这些运行成本高的OCGT是导致05:00—07:00运行成本增加的原因。在一天的中间,由于光伏发电为分布式能源聚合体提供了多余的能量,并将其出售给电网,分布式能源聚合体的收入是正数。电解制氢器被安排在早上和晚上的低价时段工作,以产生氢气供早上和晚上的价格高峰期时氢气OCGT使用。还可以看出,分布式能源聚合体全天都在从FCAS市场上产生正的收入,尽管数量相对较少。

## 2.2 本地电压支持

节点20风电场的有功和无功功率输出以及节点6在典型秋日的电压幅值如图4所示。风电场输出有功功率的能力并没有受到提供本地电压支持(local voltage support, LVS)服务的阻碍。在此情况下,这种支持可以完全通过控制风电场的无功功率注入来提供。然而,改变风电场无功功率运行点以提供本地电压支持会导致有功功率运行点移动,这可能会影响风电场参与有功功率市场的能力。

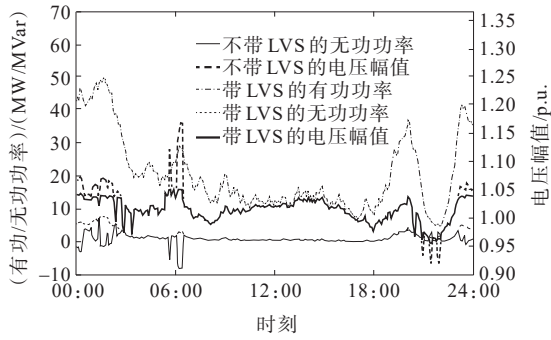


图 4 不同 LVS 服务情况下风电场有功和无功输出情况

Figure 4 Active and reactive power output of wind farm under different LVS service conditions

分布式能源聚合体在秋季典型工作日的不同时间的灵活性如图 5 所示(使用文献[20]中提出的方法创建),显示了分布式能源聚合体在不同时间的可行区域(feasible operation area, FOA),以及分布式能源聚合体可以向 6 个应急 FCAS 市场提供可能的有功/无功投标功率。一般来说,提供本地电压支持对分布式能源聚合体的有功功率设定点几乎没有影响,因此,对分布式能源聚合体的 FCAS 能力影响很小。

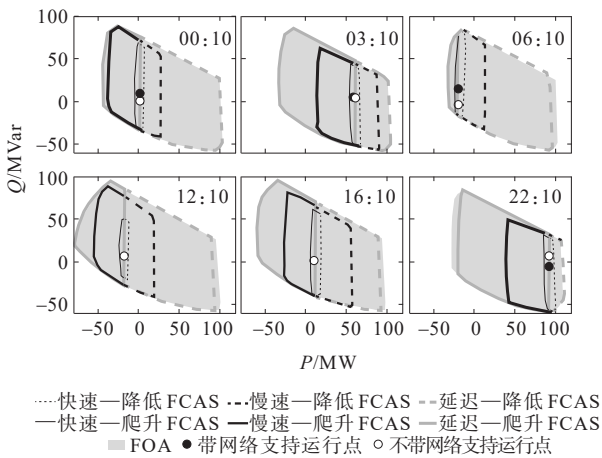


图 5 不同时间下分布式能源聚合体运行灵活性示意

Figure 5 Flexibility diagram of distributed energy polymer operation at different times

从图 5 可以看出,增加有功/无功功率的发电量会降低分布式能源聚合体产生功率的能力。这是由于对视在功率流的总体限制与母线电压限制相结合而出现的,这种局部电压支持的有效性如表 1 所示,显示了所有 10 个案例研究日中有、无本地电压支持的本地网络电压范围。

表 1 有、无本地电压支持的分布式能源聚合体电压情况

Table 1 Distributed energy polymer voltage with or without local voltage support

本地电压支持	最低电压/ p.u.	最高电压/ p.u.	超限时间 百分比/%
有	0.960 3	1.053 1	0.99
无	0.896 8	1.195 9	8.11

当提供本地电压支持时,电压略微超出了设定的电压限制,这突出了使用 OPF 方程的松弛而造成的精度的轻微损失。然而,这些违反电压约束的情况很少,而且非常接近限制,所以可以通过稍微收紧凸优化中的限制来解决这个小的不准确性。当不提供本地电压支持时,电压的数值范围要大得多,在额定电压带之外的时间也更多。因此,系统运营商可能会迫使分布式能源聚合体削减其发电量,以保持网络运行在允许的范围内。因此,这种本地电压支持也可以被视为扩大了分布式能源聚合体的运行范围,能够提供更多的主动电力服务,而没有被系统运营商削减的风险。

### 2.3 经济分析

有、无本地电压支持的分布式能源聚合体的年度现金流和净成本如图 6 所示,现金流的负数代表成本,正数代表收入;年度净成本的计算方法是一年中的成本减去收入。

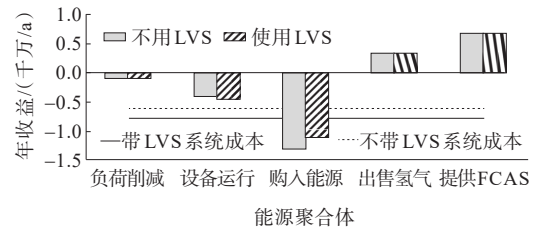


图 6 有、无本地电压支持的分布式能源聚合体的年度现金流和净成本

Figure 6 Annual cash flow and net cost of distributed energy polymer with or without local voltage support

在一年中,考虑分布式能源聚合体的负荷和可再生能源发电,还需要获得额外的约 50 GW·h 的能源,可从电网购买能源或使用其非可再生能源发电。这就是为什么分布式能源聚合体有一个年度净成本而不是年度净收入。当提供本地电压支持时,与没有本地电压支持的情况相比,分布式能源

聚合体的净成本增加了19%。主要的差异来自于能源批发市场和设备运行成本,而FCAS的收入、氢气出口和负荷削减成本的差异很小。在考虑本地电压支持时,批发能源市场的成本增加,设备运行成本减少。这主要是为了提供本地电压支持,分布式能源聚合体的有功功率输出/输入会受到限制,特别是在批发价格的极端高/低时期。因此,在极端的高/低价格时期,出口/进口电力的收入会减少,而此时分布式能源聚合体可以获得最大的收入。同时,由于出口的电力减少,设备运行成本也会减少。可以得出结论,在极端高/低价格时期,提供网络支持对参与能源批发市场的收入有重大影响。应该注意的是,对于分布式能源聚合体不提供本地电压支持的情况,没有考虑网络运营商无偿强制削减。在不提供本地电压支持的情况下,这种情况的发生将大大减少分布式能源聚合体的收入。

#### 2.4 对电网的主动电力支持

综上所述,分布式能源聚合体可以控制本地网络的无功功率,缓解本地网络的限制。此外,分布式能源聚合体有能力向电网提供无功功率支持。事实上,分布式能源聚合体可以响应系统运营商发出的请求,向电网注入/吸收无功功率。在有、无向电网提供无功功率支持情况下,分布式能源聚合体在典型的秋季工作日期间的无功功率曲线如图7所示。

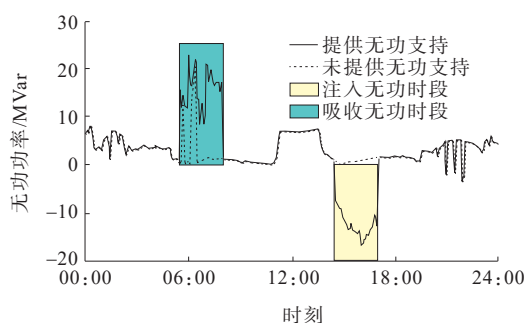


图7 有、无无功支持的分布式能源聚合体的无功功率曲线

Figure 7 Reactive power curve of distributed energy polymer with or without reactive power support

当分布式能源聚合体向电网提供无功功率支持时,其无功功率曲线发生了巨大的变化,对其有功功率能力的影响有限。这突出表明,向上游电网提供无功支持对其他市场的参与只有很小的影响。可得出结论:向电网提供无功支持可被看作是一种

附加的收入,而不影响其他市场的收入流。

### 3 结语

本文介绍了一个考虑到不确定性和多种市场运作的分布式能源聚合体优化框架,旨在缓解本地网络的限制,并为电网提供辅助服务。使用一个三阶段方法来优化机组组合、最佳储能轨迹和功率调度。结果表明,在大多数情况下,分布式能源聚合体能够提供电压和无功功率支持服务而不改变其有功功率输出。因此,在大多数情况下,这些无功功率服务对分布式能源聚合体参与能源和调频市场的影响有限。然而,在极端的价格事件中,分布式能源聚合体的运行接近其可行运行区域的边缘,因此,可能无法在不改变其有功功率输出的情况下提供无功功率支持。由于在这些极端情况下的有功功率缩减,提供本地电压支持时的运营成本有很大差别。结果还表明,向上游电网提供无功支持对分布式能源聚合体的有功功率能力没有影响或影响很小,这可能导致额外的收入,而不影响对其他市场的参与。

总的来说,本文清楚地表明了市场参与的互动关系,以及提供电网辅助服务如何能够提高分布式能源聚合体的灵活性,使其市场收入最大化。这在受本地网络限制的电力系统和新兴分布式能源市场的背景下尤其重要。

#### 参考文献:

- [1] 徐立新,沈志钧,刘明波,等.考虑配电网安全校核的分布式能源聚合商参与市场竞标的双层混合整数优化模型[J].电网技术,2021,45(11):4395-4406.  
XU Lixin, SHEN Zhijun, LIU Mingbo, et al. Double-layer mixed integer optimization model for distributed energy aggregators to participate in market bidding considering distribution network security check[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4395-4406.
- [2] 李淑静,谭清坤,张煜,等.虚拟电厂关键技术及参与电力市场模式设计研究[J].电测与仪表,2022,59(12): 33-40.  
LI Shujing, TAN Qingkun, ZHANG Yu, et al. Research on key technologies of virtual power plant and its participation in power market model design[J]. Electrical



- Measurement & Instrumentation,2022,59(12):33-40.
- [3] 潘明夷,刘念,雷金勇.含热电联产机组的分布式能源集群动态划分方法[J].电力系统自动化,2021,45(1):168-176.  
PAN Mingyi, LIU Nian, LEI Jinyong. Dynamic partition method of distributed energy clusters with cogeneration units[J].Automation of Electric Power Systems,2021,45(1): 168-176.
- [4] 郭新志,刘英新,李秋燕,等.基于智能负荷控制的分布式能源系统调控策略研究[J].智慧电力,2022,50(3):8-14.  
GUO Xinzhi, LIU Yingxin, LI Qiuyan, et al. Regulation strategy for distributed energy system based on intelligent load control[J].Smart Power,2022,50(3):8-14.
- [5] 龚超,张轩,赵越,等.考虑虚拟电厂可调能力的综合需求响应市场出清策略[J].南方电网技术,2021,15(12):56-65.  
GONG Chao, ZHANG Xuan, ZHAO Yue, et al. A comprehensive demand response market clearing strategy considering the adjustable capacity of virtual power plants [J].Southern Power System Technology,2021,15(12):56-65.
- [6] 田宇,黄婧,谢泉,等.主动配电网无功补偿和OLTC鲁棒多目标优化配置[J].中国电力,2023,56(3):94-99.  
TIAN Yu, HUANG Jing, XIE Xiao, et al. Reactive power compensation and OLTC robust multi-objective optimization of active distribution network[J]. Electric Power,2023,56(3):94-99.
- [7] KNEZOVIĆ K, MARTINENAS S, ANDERSEN P B, et al. Enhancing the role of electric vehicles in the power grid: field validation of multiple ancillary services[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 3(1): 201-209.
- [8] KIM W W, SHIN J S, KIM J O. Operation strategy of multi-energy storage system for ancillary services[J].IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(6):4409-4417.
- [9] CARDOSO G, STADLER M, MASHAYEKH S, et al. The impact of ancillary services in optimal DER investment decisions[J].Energy,2017,130:99-112.
- [10] KAZEMI M, ZAREIPOUR H, AMJADY N, et al. Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2017,8(4):1726-1735.
- [11] WENZEL G, NEGRETE-PINCEVIC M, OLIVARES D E, et al. Real-time charging strategies for an electric vehicle aggregator to provide ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,9(5):5141-5151.
- [12] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.  
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3):476-484.
- [13] ULLAH Z, MOKRYANI G, CAMPEAN F, et al. Comprehensive review of VPPs planning, operation and scheduling considering the uncertainties related to renewable energy sources[J]. IET Energy Systems Integration,2019,1(3):147-157.
- [14] 梁作宾,高山,王庆,等.低碳背景下基于自适应鲁棒优化的含源配电系统规划方法[J].电网与清洁能源, 2021, 37(12): 70-80.  
LIANG Zuobin, GAO Shan, WANG Qing, et al. A planning method for the source-containing distribution system based on adaptive robust optimization under low-carbon background[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12):70-80.
- [15] RIESZ J, GILMORE J, MACGILL I. Frequency control ancillary service market design: Insights from the Australian national electricity market[J]. The Electricity Journal,2015,28(3):86-99.
- [16] JIU Y, ZHANG D L, WANG X Y. A peak regulation ancillary service optimal dispatch method of virtual power plant based on reinforcement learning[C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 2019.
- [17] 平健,陈思捷,严正.适用于电力系统凸优化场景的能源区块链底层技术[J].中国电机工程学报,2020,40(1): 108-116+378.  
PING Jian, CHEN Sijie, YAN Zheng. The underlying technology of energy blockchain suitable for power system convex optimization scenarios[J].Proceedings of the CSEE, 2020,40(1):108-116+378.
- [18] MAVROMATIDIS G, OREHOUNIG K, CARMELIET J. Uncertainty and global sensitivity analysis for the optimal design of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2018,214:219-238.
- [19] YANG J W, ZHANG N, KANG C Q, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(5):3607-3617.
- [20] MAVROMATIDIS G, OREHOUNIG K, CARMELIET J. Design of distributed energy systems under uncertainty: a two-stage stochastic programming approach[J]. Applied energy,2018,222:932-950.