

# 支撑规模化可再生能源高效聚合的 虚拟电厂运行方法研究

刘志凯<sup>1</sup>, 余绍峰<sup>1</sup>, 刘华<sup>2</sup>, 郝长金<sup>2</sup>

(1. 浙江华电器材检测研究所有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为了提升风电并网效率,减小对传统电网的冲击,文章将风电和分布式储能电站聚合为虚拟电厂,通过刻画聚合后的运行可行域,实现削峰填谷,减少化石能源消耗和环境污染。基于聚合等值算法和与凸包边缘检测法提出了虚拟电厂灵活聚合方法,基于多目标优化算法建立了同时考虑常规机组、可再生能源机组运行约束、储能电站能量守恒及容量限制约束的目标函数组,解决了多类型机组最优出力与储能最优充放电顺序的多目标优化问题,进而在 IEEE-11 机组标准算例中,加入风电及分布式储能进行了仿真验证。算例结果表明,采用等值算法的储能与可再生能源聚合虚拟电厂方案对增加新能源消纳、降低运行费用和节约化石能源具有显著效果。

**关键词:** 可再生能源; 虚拟电厂; 分布式储能; 聚合等值

**中图分类号:** TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)02-0215-08

## 0 引言

风力发电机组运行、维护成本较低,但其随机性强,且具有明显的反调峰特性<sup>[1]</sup>,给机组组合(Unit Commitment, UC)的调度带来了新的挑战。由于现有的气象预测技术精度不足,无法准确预测风电出力曲线,因此通常采用增加额外的旋转备用方式来抵消风电随机性的影响<sup>[2,3]</sup>。但以系统安全运行目标的备用容量计算结果相比实际需求通常偏大,如果风电出力或负荷快速变化,系统中的火电机组也可能没有足够的爬坡能力提供足够的备用容量,进而导致电能无法实时平衡、系统失稳等严重问题<sup>[4-6]</sup>。另外,通过模拟所有风电机组出力情况,将风电并网的机组组合优化问题分成包含多个确定性场景的优化问题求解<sup>[7]</sup>,也可以平抑风电波动,但随着预测误差的增加,满足多个场景的系统运行总费用也增加,经济性变差,甚至可能造成优化问题无解<sup>[8]</sup>。

分布式储能(Distributed Energy Storage, DES)能够通过自身充放电过程,消纳新能源发出的多余电量,并在用电高峰时供给负荷<sup>[9-11]</sup>。但分布式储能单体容量小、位置分散、总数量多,直接作为电源设备加入传统机组组合优化模型会产生求解

困难,因此需要通过虚拟电厂技术,将大量分布式可再生能源与储能的运行特性及约束条件进行聚合。由于储能设备自身无法生产电能,必须保证每个调度周期开始和结束的剩余电量平衡,才能实现长期稳定的充放电运行。因此在含有储能的机组组合优化模型中,不仅要考虑传统机组的运行约束,还需要考虑每个调度周期内储能的充放电顺序问题,保证能量平衡,满足容量限值。

传统的机组组合多采用优先顺序法、动态规划、拉格朗日松弛算法等优化算法,但以上常规算法在处理电力系统中较大规模的机组组合问题时,可能产生“维数灾”的问题。近年来,现代智能优化算法<sup>[12]</sup>能有效解决这一问题,其中,模拟退火法<sup>[13]</sup>全局性好但求解速度慢,蚁群算法鲁棒性强但容易发生不收敛的情况<sup>[14]</sup>,而粒子群优化法(Particle Swarm Optimization, PSO)同时满足计算速度快、鲁棒性强的特点,且方便针对不同场景进行改进,适应性强<sup>[15]</sup>。因此,本文利用多目标的粒子群聚合等值算法,将分布式可再生能源机组与储能电站聚合为虚拟电厂建立机组组合优化模型并计算,解决含风电-储能的机组组合优化问题。

收稿日期: 2022-11-23。

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFG0348)。

作者简介: 刘志凯(1984-),男,博士,高级工程师,主要从事充电设施检测技术研究。E-mail: liuhua90@qq.com

### 1 支撑储能高效聚合的虚拟电厂运行框架

高比例风电资源渗透下的电力系统可能出现系统失稳、备用需求增加、机组组合问题求解成本增加等问题。输电网内的大量分布式储能可以凭借自身充电过程促进可再生能源消纳,自身放电过程在负荷高峰期提供电能,由此解决可再生能源带来的系统失稳与备用需求增加等难题。

由于输电网中广泛存在的分布式储能具有独特的运行状态与控制方式,不同储能的荷电状态、容量限制、充放电功率限制均可能存在差异,若分布式储能将自身约束分散式地递交上级调度中心,调度中心难以处理分布式储能递交的海量信息与复杂的机组组合模型,这将大幅降低调度效率。本文提出了支撑规模化可再生能源聚合的虚拟电厂运行方法,基于闵可夫斯基和算法和与凸胞边缘检测法,将输电网内的大量分布式储能可行域等值聚合,聚合后的分布式储能以虚拟电厂的形式参与电力系统的统一调度,如图1所示。

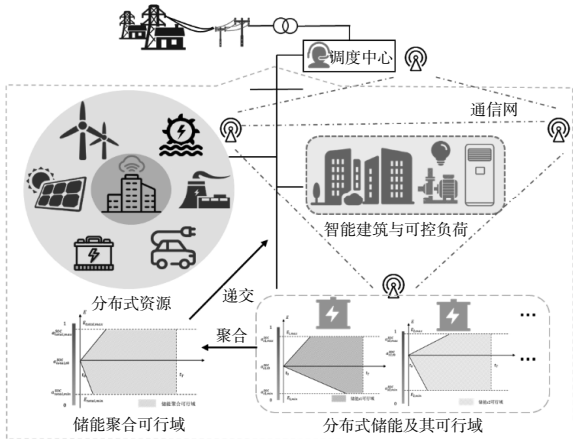


图1 支撑储能有效聚合的系统运行框架

Fig.1 A system operating framework to support efficient aggregation of energy storage

虚拟电厂仅需向调度中心递交聚合后的储能可行域,这将大幅简化含有分布式储能的机组组合优化模型,减小调度中心面临的计算负担。最终,基于粒子群优化算法求解内嵌交流潮流约束的风电-储能机组组合优化问题。

### 2 含风电与分布式储能的机组组合模型

含有风电与分布式储能的系统由风力发电机组、传统火-水电机组及大规模分布式储能聚合成的虚拟电厂组成,针对该系统的机组组合须要解决不同类型储能聚合为虚拟电厂的约束重构问题。

#### 2.1 分布式储能单独运行时的约束条件

仅考虑分布式储能作为系统中的供电电源时,既要保证储能供电满足系统中的功率实时平衡和负荷的用电需求,也要考虑储能设备自身的安全与稳定,避免过度充放电造成储能电池局部过热,影响设备寿命、甚至引发爆炸等事故的情况。因此,必须从系统要求与储能自身安全两方面分析,确定储能电站充分发挥供电能力的约束条件<sup>[16]</sup>。

##### ①系统功率平衡约束

储能电站在并网状态下要保证作为供电电源时的系统功率平衡约束。

$$P_{s,t} - P_{l,t} = 0, \forall t \quad (1)$$

式中: $P_{s,t}$ 为 $t$ 时刻储能发出的功率; $P_{l,t}$ 为 $t$ 时刻负荷的功率需求。

##### ②储能实时功率与剩余容量约束

在系统中,需要时刻保证储能为系统提供足够的备用容量和供电功率,以保证重要负荷的不间断运行,约束条件为

$$P_{\text{ess}} \leq P_{s,t} \leq P_s^{\text{rate}}, \forall t \quad (2)$$

$$E_{\text{ess}} \leq E_{s,t} \leq E_s^{\text{rate}}, \forall t \quad (3)$$

$$E_{s,\text{min}} \leq E_{s,t} \leq E_{s,\text{max}}, \forall t \quad (4)$$

$$E_{s,t} = E_{s,t-1} + P_{s,t-1}^{\text{cha}} - P_{s,t-1}^{\text{dis}}, \forall t \quad (5)$$

式(2)为储能实时功率约束,式(3)~(5)为储能剩余容量约束。式中: $P_s^{\text{rate}}$ 为储能设备的额定功率; $P_{\text{ess}}$ 为重要负荷正常运行所要求的最低功率; $E_s^{\text{rate}}$ 为储能设备的额定容量; $E_{s,t}$ 为 $t$ 时刻储能电池剩余的电量; $E_{s,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻储能电池剩余的电量; $E_{\text{ess}}$ 为保证重要负荷正常运行的系统中必须保持的备用容量; $E_{s,\text{max}}, E_{s,\text{min}}$ 分别为储能最大、最小容量; $P_{s,t-1}^{\text{cha}}, P_{s,t-1}^{\text{dis}}$ 分别为 $t-1$ 时刻储能电站的充电功率、放电功率。

##### ③储能设备充电与放电深度约束

为保证储能电池的使用寿命和运行安全稳定性,对储能电池的充、放电深度有一定要求,通常用充电状态(State of Charge, SOC)表示,其约束为

$$a_{\text{SOCmin}} \leq a_{\text{SOC},t} \leq a_{\text{SOCmax}}, \forall t \quad (6)$$

$$a_{\text{SOC},t} = a_{\text{SOC},t-1} + \frac{1}{E_s^{\text{cap}}} \left( \mu_s^{\text{cha}} P_{s,t-1}^{\text{cha}} - \frac{1}{\mu_s^{\text{dis}}} P_{s,t-1}^{\text{dis}} \right), \forall t \quad (7)$$

式中: $a_{SOC,t}$  为  $t$  时刻储能设备的实时充电状态; $a_{SOCmin}, a_{SOCmax}$  分别为储能设备的最小充电状态(放电极限)和最大充电状态(充电极限); $a_{SOC,t-1}$  为  $t-1$  时刻储能设备的实时充电状态; $E_s^{cap}$  为储能电站容量; $\mu_s^{cha}, \mu_s^{dis}$  分别为储能电站充、放电效率。

④储能设备长期稳定运行约束

为保证储能设备为系统长期稳定供电,每个调度周期开始和结束时储能电站应处于相同的平衡状态,即设备的剩余容量应该相同。

$$E_{s,t} = E_{s,0} \quad (8)$$

2.2 灵活性聚合等值模型

系统中的分布式能源可能具有不同的性能参数与运行条件约束,为将其聚合为虚拟电厂,还需要将不同特性的储能电站或可再生能源机组约束聚合为整体,才能进行机组组合优化的计算。分布式储能的约束可由充电状态可行域表征,充电状态具有运行的上下限,由于不同储能运行状态与控制方式存在差异,其可行域同样存在差异。本文采用基于聚合等值算法和与凸胞边缘检测法的聚合方法,通过正方形与三角形可行域说明闵可夫斯基和的聚合过程,随后将该方法应用于分布式储能,以解决各种不同储能电站的灵活性聚合问题。其中闵可夫斯基和为

$$A+B=\{a+bla \in A, b \in B\} \quad (9)$$

式中: $A$  集合与  $B$  集合聚合后的范围,由  $A$  集合中的任意元素  $a$  与  $B$  集合中的任意元素  $b$  叠加得到。

在分布式储能与可再生能源机组的灵活性求解场景中,将不同储能约束灵活性空间的顶点依次求和,即可形成可能边界点集,随后利用凸胞边缘检测法选出点集的最外层并连接相邻顶点,绘制出聚合后可行域。通过简单案例表征了基于闵可夫斯基和的不同类型可行域聚合流程,如图2所示。

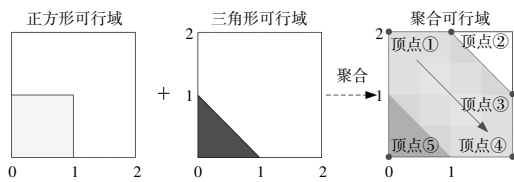


图2 闵可夫斯基和的聚合过程说明

Fig.2 Schematic diagram for solving Minkowski Sum

对于分布式储能而言,充放电功率限制、容量

限制、量测时刻等约束构建了储能的可行域,由于每一储能可行域存在差异,分散式地向调度中心递交可行域及各类约束将造成巨大的计算负担。因此,利用闵可夫斯基和方法,聚合储能可行域,将有效提高调度效率。图3为分布式储能的聚合过程。

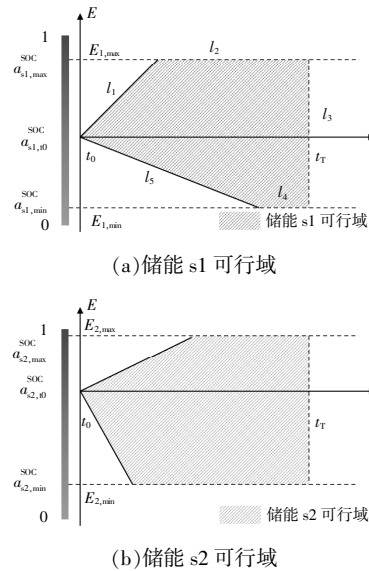


图3 分布式储能可行域

Fig.3 Feasible region of distributed energy storage

图中: $l_1$  为储能充电功率约束,该约束斜率为储能  $s_1$  最大充电功率  $P_{s1,max}^{cha}$ ;  $l_2$  为储能最大容量约束;  $l_3$  为量测时刻约束;  $l_4$  为储能最小容量约束;  $l_5$  为放电功率约束,该约束斜率的绝对值为储能  $s_1$  最大放电功率  $P_{s1,max}^{dis}$ 。

利用闵可夫斯基和方法聚合上述两个储能的可行域,储能聚合可行域如图4所示。

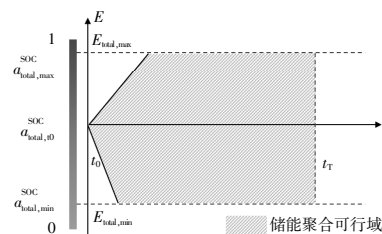


图4 储能聚合可行域

Fig.4 Aggregation feasible region of energy storage

图4为储能  $s_1$  与储能  $s_2$  可行域聚合后的可行域,表示储能  $s_1$  可行域与储能  $s_2$  可行域顶点任意加和后点集的最外层凸胞。5条边界的物理意义:聚合储能最大充电功率约束,该约束斜率为

$P_{total,max}^{cha} = P_{s1,max}^{cha} + P_{s2,max}^{cha}$ , 聚合储能最大容量约束, 最大容量为  $E_{total,max} = E_{s1,max} + E_{s2,max}$ ; 量测时刻约束; 聚合储能最小容量约束, 最小容量为  $E_{total,min} = E_{s1,min} + E_{s2,min}$ ; 聚合储能最大放电功率约束, 该约束斜率绝对值为  $P_{total,max}^{dis} = P_{s1,max}^{dis} + P_{s2,max}^{dis}$ 。

此外, 聚合储能荷电状态(SOC)为

$$a_{total,t}^{SOC} = \frac{\sum_{s \in \phi^s} a_{s,t}^{SOC} E_{s,max}}{\sum_{s \in \phi^s} E_{s,max}}, \forall t \quad (10)$$

式中:  $a_{s,t}^{SOC}$  为  $t$  时刻储能  $s$  的荷电状态;  $a_{total,t}^{SOC}$  为  $t$  时刻储能聚合后的荷电状态。

### 2.3 安全运行约束条件

#### ①功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{n_{wind}} P_{i,t}^w + \sum_{i=1}^{n_{thermal}} P_{i,t}^{th} + P_t^d + P_t^c = P_t^L \quad (11)$$

式中:  $n_{wind}$  为风电机组数量;  $P_{i,t}^w$  为第  $i$  个风电机组在第  $t$  个时段内根据天气和出力计划预测的功率;  $P_{i,t}^{th}$  为第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段内的功率;  $P_t^L$  为第  $t$  个时段的负荷功率;  $P_t^d$  和  $P_t^c$  分别为聚合后的储能系统在第  $t$  个时段的放电、充电功率, 为区分充电和放电的不同状态, 本文限定  $P_t^d \geq 0$ ,  $P_t^c \leq 0$ 。

#### ②火电机组出力上下限约束

$$I_{i,t}^{th} P_{i,t,min}^{th} \leq P_{i,t}^{th} \leq I_{i,t}^{th} P_{i,t,max}^{th} \quad (12)$$

式中:  $P_{i,t,min}^{th}$  和  $P_{i,t,max}^{th}$  分别为第  $i$  个火电机组第  $t$  个时段内出力的下限和上限,  $I_{i,t}^{th}$  为第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段内是否开机的变量, 开机取值为 1, 关机为 0。

#### ③火电机组旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{n_{thermal}} I_{i,t}^{th} P_{i,t,max}^{th} + \sum_{i=1}^{n_{wind}} P_{i,t}^w + P_t^d + P_t^c \geq P_t^L + R_t \quad (13)$$

式中:  $R_t$  为第  $t$  个时段的旋转备用要求。

#### ④火电机组的最小启停时间约束

根据火电机组的固有特性, 每台火电机组都有最小开机、停机时间要求, 必须满足这些时间约束后才能改变运行状态, 即:

$$\begin{cases} \sum_{t=T_{i,min}^{th,U}-1}^{t+T_{i,min}^{th,U}-1} I_{i,t}^{th} \geq T_{i,min}^{th,U} Y_{i,t}^{th} \\ \sum_{t=T_{i,min}^{th,D}-1}^{t+T_{i,min}^{th,D}-1} (1-I_{i,t}^{th}) \geq T_{i,min}^{th,D} Z_{i,t}^{th}, \forall g, t \\ Y_{i,t}^{th} + Z_{i,t}^{th} \leq 1 \\ Y_{i,t}^{th} - Z_{i,t}^{th} = I_{i,t}^{th} - I_{i,t}^{th} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $T_{i,min}^{th,U}$  为第  $i$  个火电机组的最小开机时间;  $T_{i,min}^{th,D}$  为第  $i$  个火电机组的最小停机时间;  $Y_{i,t}^{th}$  和  $Z_{i,t}^{th}$  分别为第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段是否开机和关机的整数变量, 如果第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段开机, 则  $Y_{i,t}^{th}=1, Z_{i,t}^{th}=0$ ; 如果第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段关机, 则  $Y_{i,t}^{th}=0, Z_{i,t}^{th}=1$ ; 其余情况  $Y_{i,t}^{th}=0$  且  $Z_{i,t}^{th}=0$ 。

#### ⑤火电机组的爬坡约束

根据火电机组的固有特性, 每台火电机组的功率变化速率都有其最大限值, 必须在这些约束内调节火电机组的出力, 即:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{th} - P_{i,t-1}^{th}, R_{th,i}^U I_{i,t-1}^{th} + S_{th,i}^U (I_{i,t}^{th} - I_{i,t-1}^{th}) \\ P_{i,t-1}^{th} - P_{i,t}^{th}, R_{th,i}^D I_{i,t-1}^{th} + S_{th,i}^D (I_{i,t-1}^{th} - I_{i,t}^{th}) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $R_{th,i}^U$  和  $R_{th,i}^D$  分别为第  $i$  个火电机组的爬坡、滑坡速率;  $S_{th,i}^U$  和  $S_{th,i}^D$  分别为第  $i$  个火电机组的开机、停机爬坡速率。

#### ⑥线路潮流约束

本文研究对象为电压等级较低的虚拟电厂, 直流潮流在低电压等级的潮流计算中存在一定的偏差。因此, 本文考虑线路交流潮流模型为

$$P_{ij,t} = g_{ij} U_{i,t}^2 - g_{ij} U_{i,t} U_{j,t} \cos \theta_{ij,t} - b_{ij} U_{i,t} U_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \quad (16)$$

$$Q_{ij,t} = -b_{ij} U_{i,t}^2 + b_{ij} U_{i,t} U_{j,t} \cos \theta_{ij,t} - g_{ij} U_{i,t} U_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \quad (17)$$

$$-P_{ij,max} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,max} \quad (18)$$

$$-Q_{ij,max} \leq Q_{ij,t} \leq Q_{ij,max} \quad (19)$$

式中:  $P_{ij,t}$  为  $t$  时刻线路  $i-j$  的有功潮流;  $Q_{ij,t}$  为  $t$  时刻线路  $i-j$  的无功潮流;  $g_{ij}$  为线路  $i-j$  的电导;  $b_{ij}$  为线路  $i-j$  的电纳;  $\theta_{ij}$  为线路  $i-j$  的相角差;  $U_{i,t}$  和  $U_{j,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  与节点  $j$  电压;  $P_{ij,max}$  为线路  $i-j$  有功潮流最大值;  $Q_{ij,max}$  为线路  $i-j$  无功潮流

最大值。

2.4 调度模型优化的目标函数

在机组组合问题中,优化目标是系统运行的总成本最低,同时提供最优的社会经济效益。在本文中,考虑风电场和分布式储能建成投运后的维护成本较低,因而忽略其运营费用,将模型优化的目标函数设计为

$$\min \sum_{i=1}^{n_{\text{thermal}}} \sum_{t=1}^T (a_i P_{i,t}^{\text{th}} + b_i P_{i,t}^{\text{th}} + c_i (P_{i,t}^{\text{th}})^2 + u_{i,t}^{\text{th}} + d_{i,t}^{\text{th}}) \quad (20)$$

式中: $n_{\text{thermal}}$  为火电机组总数; $T$  为调度周期的时段总数; $i$  为火电机组编号; $t$  为时段编号; $P_{i,t}^{\text{th}}$  为第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段的有功功率; $u_{i,t}^{\text{th}}$  和  $d_{i,t}^{\text{th}}$  分别为第  $i$  个火电机组在第  $t$  个时段的开机、停机费用,仅在开机或停机动作的时段产生相关费用,如果在某个时段未开机或保持运行未停机,则费用为 0。

为保证储能长期稳定运行,在一个周期(通常为 1)的调动安排后,其剩余电量应该与周期开始时尽可能相同,这样才不会在长期工作中因电能逐渐充满或耗尽而无法运行。因此,机组组合优化模型的目标函数为

$$\min |E_{s,T} - E_{s,0}| \quad (21)$$

综上所述,在含有风电场和储能电站的机组组合优化问题求解过程中,优化的目标函数为两个,采用传统的优化算法难以求解,需要采用多目标的优化求解算法。

2.5 基于多目标粒子群优化算法的求解步骤

基于多目标粒子群优化算法的求解流程如图 5 所示。

3 算例分析

3.1 场景设置

本文仿真算例采用 IEEE-11 机组标准算例进行计算,系统中包含了 10 台火电机组、1 个风力发电厂、1 个由储能聚合的虚拟电厂,各个机组出力、启停时间、耗能集成本等参数参见 IEEE 标准。IEEE-11 节点系统拓扑结构如图 6 所示。风电出力与日负荷的预测误差设置为 10%,调度周期设置为 1(24 h)。在粒子群算法部分,设定粒子群中粒子数目为 40,粒子维数为 1,最大迭代次数为 20 次,储能电站的充电状态 SOC 参数初始值为 0.5,认知学习因子为 0.008;社会学习因子为

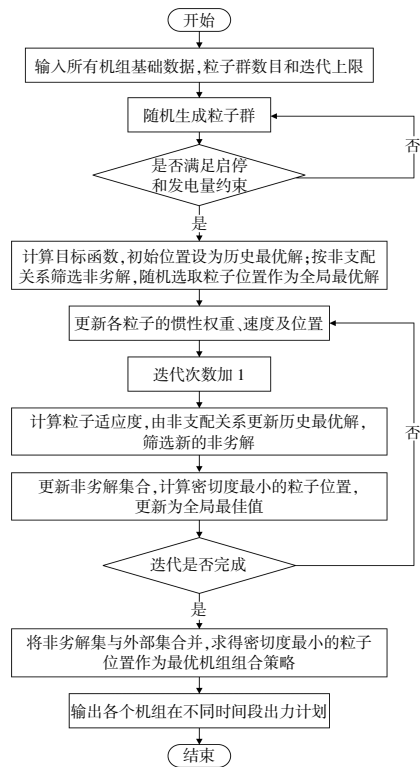


图 5 多目标粒子群优化算法求解含储能虚拟电厂的机组组合问题流程图

Fig.5 Flow chart of MOPSO solving unit combination problem with virtual power plant

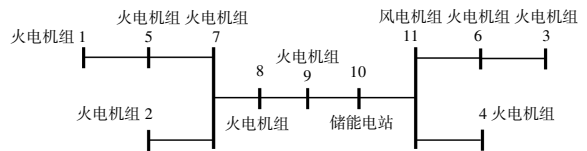


图 6 IEEE-11 节点系统拓扑结构

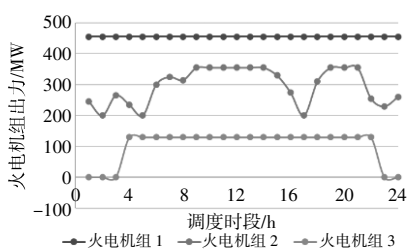
Fig.6 Topology structure of IEEE-11 bus system

0.008;惯性权重起始值为 0.1,结束值为 1;权重更新方式按式(15)计算。

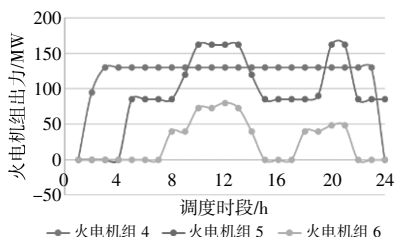
3.2 虚拟电厂接入传统电网的机组组合问题

在未接入虚拟电厂时,采用常规的 PSO 法计算机组组合问题,得到每个调度周期内系统的运行总费用为 568 100 美元。在本节场景中不考虑风电机组的出力,使用多目标粒子群优化算法得出在储能电站聚合成的虚拟电厂接入情况下,单个调度周期内系统运行费用降至 497 253 美元。各机组的发电出力曲线如图 7 所示。

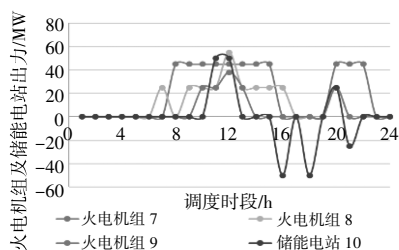
由图 7 可以看出,在 11 时用电高峰时期各火电机组出力之和为 1 400 MW,由储能聚合的虚拟电厂出力为 50 MW,满足高峰时期用电负荷要求。到 16 时负荷突然下降,由于火电机组降出力



(a)火电机组 1~3 出力情况



(b)火电机组 4~6 出力情况



(c)火电机组 7~9 及储能电站出力情况

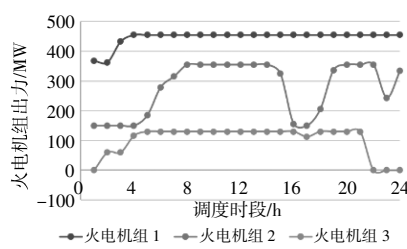
图 7 虚拟电厂接入传统电网的机组出力情况

Fig.7 Unit output of traditional power grids with virtual power plants

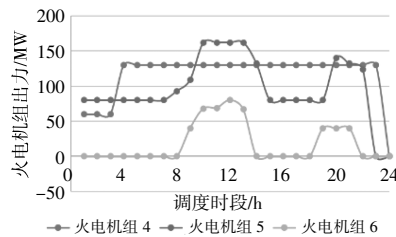
速率变化的限制,由虚拟电厂发挥灵活调节能力,迅速变为充电方式运行吸收多余功率,避免了能源浪费和源荷不平衡。由图 7(c)中储能机组的出力变化情况可知,在 24 h 内,虚拟电厂共被安排动作 6 次,充放电总功率 250 MW,完成一个调度周期后的剩余电量与周期开始时相同。可以看出,本文中使用的多目标粒子群优化算法完成了最优出力与储能充放电的多目标优化,并且实现运行费用降低 12.5%,有效降低了传统电网能耗和总成本。

### 3.3 虚拟电厂接入新能源电网的机组组合问题

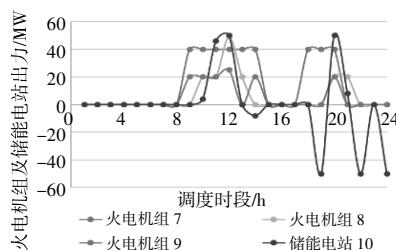
本节算例中的新能源电网包括传统机组和风电场,并考虑了风力发电的波动性与反调峰特性。聚合的风电场容量为 100 MW,按照某典型日风力发电历史数据等直接入电网,如图 8 所示。仅接入风力发电时运行费用为 543 910 美元,这是因为风力发电虽然运行成本较低,却增加了系统其它火电机组的启停成本和爬坡成本,因此只投



(a)火电机组 1~3 出力情况



(b)火电机组 4~6 出力情况



(c)火电机组 7~9 及储能电站出力情况

图 8 虚拟电厂接入新能源电网的机组出力情况

Fig.8 Unit output of new energy grids with virtual power plants

运风电机组后,系统也需要保留一定的旋转备用,实际运行费用和化石能源消耗降低并不明显。而当分布式风电场与储能电站共同接入新能源电网参与联合机组调度优化时,运行总费用可降低至 468 361 美元,这反映出采用多目标粒子群优化算法的虚拟电厂调度方案对实现负荷削峰填谷、增加消纳新能源、降低化石能源消耗和系统总成本具有重要作用。

从图 8 的火电机组与虚拟电厂的总出力情况可以看出,风力发电接入后,由于风力的波动性,电网的峰谷差增加,给供电机组的调峰能力带来了更大的挑战。例如,通常夜里风速较大,风电机组出力增加,而储能在 24 时从系统吸收 50 MW 的电能,消纳了多余风电,保证了源荷实时平衡,也避免了火电机组关停。由图 8(c)中储能聚合虚拟电厂的出力曲线可知,在风电接入的情况下,储能电站共被安排动作 9 次,充放电总功率为 316 MW,与 3.2 节算例相比,其出力大于无风电时的

状态,储能的灵活调峰能力得到了更好的应用,并且将总成本降低了 13.9%。在储能电站接入前,新能源电网消纳分布式风电场输出的电能为 921.96 MW·h;在储能电站与分布式风电场共同接入新能源电网后,分布式风电场输出电能达 1 225.35 MW·h,可再生能源的消纳率提高了 19.93%。这充分证明了采用多目标粒子群优化算法的虚拟电厂调度方案可有效提升可再生能源的消纳率。

### 3.4 经济性对比

对比两个算例中的 4 种计算场景,各机组投入情况如表 1 所示。4 种情况下的运行成本如图 9 所示。

表 1 仿真算例中 4 种情况对比  
Table 1 Comparison in various situations

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
火-水电机组	√	√	√	√
风电厂	×	×	√	√
储能电站	×	√	×	√

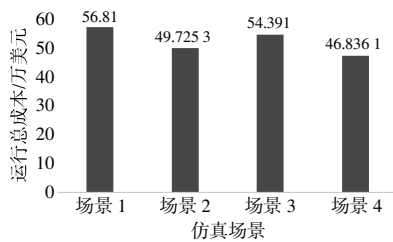


图 9 表 1 中的 4 种仿真场景的运行总成本对比

Fig.9 Comparison of total operation cost of four simulation scenarios listed in table 1

由表 1 及图 9 可以看出,分布式储能电站聚合成的虚拟电厂投入后,系统运行总成本明显降低。由于风速受气候影响具有很强的随机性和不确定性,而传统机组的惯性较强,调峰需要保持一定的旋转备用,因此风力发电的波动会增加传统的火电、水电等机组的调峰费用,单独风电作为新能源加入系统对总运行成本降低的作用不够显著;当分布式储能与风电场同时投入时,能够有效减少火电机组的频繁启停,降低火电机组能耗,发挥风电等新能源运行成本低的优势,提高整个系统运行的经济性。

## 4 结论

为了提升分布式新能源机组并网渗透率,减少对火电机组的冲击,本文提出了基于闵可夫斯基和与凸胞边缘检测法的分布式能源聚合成虚拟电厂的方法。通过多目标粒子群优化算法计算出

最优机组调度方案与储能充放电顺序,实现了含分布式可再生能源与储能电站的虚拟电厂的机组组合求解。基于 IEEE-11 机组标准算例的结果表明:①本文中使用的多目标粒子群优化算法既分析了不同机组在同时段内的出力约束,也分析了不同时段内各储能电站的能量平衡与容量限值,成功解决了目标函数组中最优出力与储能充放电平衡的多目标优化问题;②分布式储能聚合的虚拟电厂单独接入能够有效提高系统的调峰能力,同时在分布式风力机组聚合风电场的影响下,储能电站能够增加充放电动作次数,从而发挥更好的调峰效果,增加新能源的消纳;③储能电站与风电场同时投入电网能够减少火电机组的备用容量与启停次数,降低系统运行总成本。

综上所述,采用多目标粒子群优化算法的分布式储能聚合虚拟电厂调度方案,对负荷削峰填谷、消纳新能源、降低运行费用和能源消耗具有良好效果。

### 参考文献:

- [1] 刘永奇,陈龙翔,韩小琪.能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J].中国电机工程学报,2022,42(2): 515-524.
- [2] 李本新,韩学山,蒋哲,等.应对风电间歇性的火电机组组合模型与分析[J].电网技术,2017,41(5):1569-1577.
- [3] 李鹏,王亭岭.考虑可再生能源不确定性的最优潮流研究[J].可再生能源,2021,39(8):1117-1123.
- [4] 马留洋,孟安波,胡函武.基于离散纵横交叉算法的含风电电力系统机组组合优化[J].广东电力,2018,31(2):38-44.
- [5] 王涛,胡丽,刘子菡,等.考虑灵活性需求与风电相关性的电力系统实时调度模型[J].全球能源互联网,2021,4(6):585-594.
- [6] 王成福,王昭卿,孙宏斌,等.考虑预测误差时序分布特性的含风电机组组合模型[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4081-4090.
- [7] 杜永峰.计及风光不确定性的电气热综合能源系统日前区间优化[J].热力发电,2022,51(2):85-91.
- [8] 赵晶晶,应伦杰,屈靖雅.多区域含冷热电联供和储能的综合能源系统运行优化[J].电测与仪表,2022,59(10):16-22.
- [9] 李本新,韩学山,刘国静,等.风电与储能系统互补下的火电机组组合[J].电力自动化设备,2017,37(7):

- 32-37,54.
- [10] 孙煜华,吴永欢,梁林森,等.基于智能水滴算法的火电机组发电调度问题研究 [J]. 电力与能源,2019,40(2):120-125.
- [11] 胡勇胜,罗立军,张培,等.基于模拟退火粒子群算法的五强溪水电站厂内经济运行模型与应用[J].水电能源科学,2021,39(9):81-85.
- [12] 李颖浩,郭瑞鹏.求解机组组合问题的多种群混沌蚁群算法[J].电力系统保护与控制,2012,40(9):13-17.
- [13] 唐京瑞,毕贵红,王曦.基于小世界网络的 PSO 算法在电力系统中的应用[J].中北大学学报(自然科学版),2012,33(2):135-140.
- [14] 李志浩,刘鑫,倪筹帷,等.基于场景集的虚拟电厂中储能系统优化配置研究[J].电气传动,2021,51(16):65-71.
- [15] 刘方,徐耀杰,杨秀,等.考虑电能交互共享的虚拟电厂集群多时间尺度协调运行策略 [J]. 电网技术,2022,46(2):642-656.
- [16] 汪洋叶,赵力航,常伟光,等.基于模型预测控制的虚拟电厂储能系统能量协同优化调控方法 [J]. 智慧电力,2021,49(7):16-22.

## Research on large-scale renewable energy efficient aggregation based on virtual power plant operation method

Liu Zhikai<sup>1</sup>, Yu Shaofeng<sup>1</sup>, Liu Hua<sup>2</sup>, Hao Changjin<sup>2</sup>

(1.Zhejiang Huadian Equipment Testing and Research Institute Co.,Ltd., Hangzhou 310000, China; 2.Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to improve the grid connected efficiency of large-scale renewable energy and reduce the impact on traditional power grid, this paper studies the method of aggregating distributed renewable energy and energy storage stations into virtual power plants. By describing the feasible operation domain after aggregation, peak shaving and load filling can be realized, and fossil energy consumption and environmental pollution can be reduced. A virtual power plant flexible polymerization method based on Minkowski sum and convex cell edge detection is proposed. Based on Multiple Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm, A set of objective functions was established considering both conventional unit operation constraints and energy conservation and capacity constraints of energy storage power station. The multi-objective optimization problem of optimal output of multi-type units and charge and discharge sequence of the distributed energy storage was solved, and the unit commitment optimization with virtual power plant was realized. Furthermore, wind power plant and distributed energy storage are added into the standard case of IEEE-11 units for simulation verification. The calculation results show that the virtual power plant scheme based on MOPSO optimization has significant effects on renewable energy accommodation, operation cost reduction and fossil energy saving.

**Keywords:** renewable energy resources; virtual power plant; distributed energy storage; aggregate equivalence