

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.005

# 新能源全消纳并网友好型虚拟发电厂优化调度研究

徐天奇<sup>1</sup>, 田业<sup>1</sup>, 高鑫<sup>2</sup>, 李红坤<sup>2</sup>, 李琰<sup>1</sup>

(1. 云南民族大学电气信息工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330001)

**摘要:**虚拟发电厂利用智能测量、网络通信、智能决策等先进技术,将分布式发电整合为一个整体向电网供电,有望成为大规模新能源电力接入的支撑框架。文中所构建的虚拟发电厂以其并网经济效益最大化为目标,同时考虑新能源出力的不确定性给电网带来的不利影响,通过引入波动因子参数和奖惩机制来限制其并网功率的波动性。在此基础上,以储能系统和可中断负荷为调度资源,对新能源发电进行全部消纳。最后,在相关约束条件限制下采用粒子群算法进行寻优。算例结果表明,该方法能在全部消纳新能源发电的基础上,有效抑制虚拟发电厂的并网功率波动性,极大提高了新能源接入的友好性。

**关键词:**虚拟发电厂;分布式发电;经济效益最大化;波动因子;奖惩机制;并网功率波动性

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0033-06

## 0 引言

新能源发电是有效解决气候变暖等方法之一<sup>[1]</sup>,但其不可控性和随机性十分突出<sup>[2]</sup>,因此当新能源大规模并网时,会严重妨碍电网的稳定、经济运行<sup>[3-4]</sup>。新能源发电的快速发展,已经给传统电力系统造成巨大压力<sup>[5-6]</sup>,弃风弃光现象比较严重。

分布式新能源发电投资小、灵活方便,近年来得到快速发展。虽然分布式新能源发电单机容量小,但当其大规模并网时,由于规模效应和气候条件时空相关性,出力不确定性可能会被放大,从而给电力系统频率稳定和可靠性带来严重挑战,反而可能会限制分布式新能源的发展<sup>[7-8]</sup>。

虚拟发电厂(virtual power plant, VPP)技术是解决这个问题的可行性方案之一。VPP通过分布式控制、精确计量和实时通信等技术,把分布在不同地域的不同类型分布式电源、储能系统、可控负荷、传统负荷等元件在逻辑上聚合在一起,通过实时调度软件实现整体的协调和优化运行,使其从电网角度来看与一个传统电厂类似<sup>[9-11]</sup>。作为一种新的运营管理模式,VPP在整合分布式新能源方面显现出巨大的潜力。利用VPP的协调控制优化,可以显著降低分布式电源因分别单独并网对电力系统造成的不利影响。通过分布式电源有序接入电网,增加整个系统运行的可靠性,在充分利用新能源出力的同时,可显著改善电网出力不稳定的情况,既能

保证电力供应安全、优质、经济、环保的基本需求,也能满足充分消纳可再生资源的要求<sup>[12-13]</sup>。另外,利用VPP技术,不需要对电网进行改造,也不会改变各个分布式电源与电网连接的方式。

文献[14]把建筑当做VPP来管理,利用可延迟负荷作为资源进行调度,实际上只是需求侧响应而并不是真正的VPP;文献[15]将新能源分布式发电、水电站、抽水蓄能以及当地负荷组成VPP,以主网交换电量最低及电费最低为目标进行调度;文献[16]提出由风电、可再生能源发电技术(power to gas, P2G)、燃气机组碳捕集以及热点联产燃气机组聚合为VPP,以VPP受益最大为目标进行调度;文献[17]从电力市场的角度考虑VPP的调度问题,同时对日前市场和实时市场交易进行优化,引入条件风险价值系数来衡量日前市场和风光出力预测的不确定性,仅把风险作为一个可选择的参数并入利润,未能体现不确定性对调度的影响。这些研究都未将新能源消纳作为调度目标之一,也未考虑VPP并网功率的平稳性。

为了尽可能地消纳新能源,并使VPP更加平稳地向电网输送电能,文中提出波动因子及奖惩机制,以可中断负荷和储能系统为调度资源,构建新能源全消纳的VPP并网经济效益最大化模型,通过粒子群算法<sup>[18]</sup>进行寻优,得到VPP的利润最优值。算例对比验证了此调度模型可使VPP获得最大经济效益,同时提高并网功率的平稳性。

## 1 VPP模型

文中考虑以一个包含分布式风力发电、光伏发

收稿日期:2020-09-12;修回日期:2020-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61761049)

电、储能系统、普通负荷和可中断负荷的 VPP 向电网供电,如图 1 所示。

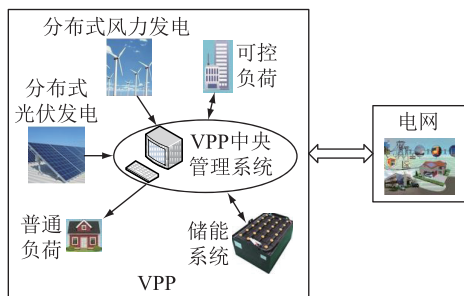


图 1 含分布式新能源的 VPP  
Fig.1 VPP containing distributed new energy power generation

以促进分布式新能源发电并网规模化应用为目标,考虑的 VPP 内部的发电单元仅包含分布式新能源而不包含传统分布式电源。

针对图 1 所示含分布式新能源的 VPP,以储能系统和可中断负荷作为调度资源,对新能源进行全部消纳,可中断负荷良好的可调节性<sup>[19]</sup>以及储能系统的转移特性<sup>[20-21]</sup>一定程度上可以弥补新能源发电出力随机性给电网带来的负面影响。

## 2 VPP 成本模型及奖惩机制

### 2.1 电池储能系统成本模型

文献[22—23]提出考虑寿命损耗成本的储能单元分布式协同控制策略,但该成本模型只考虑了电池储能系统的寿命成本。在此基础上,文中提出一个更加完整的电池储能系统成本模型,不仅考虑电池储能系统的寿命成本,还包括了电池储能系统的运维的成本和能量损失成本,如下所示:

$$C_B = \sum (C_{bl} + C_{O\&M} + C_{pl}) \quad (1)$$

其中:

$$C_{bl} = \frac{C}{aQ_N^b} Q^b \quad (2)$$

$$C_{O\&M} = C_m P_{bat, rat} + C_o (g_{bat}^+ + g_{bat}^-) \quad (3)$$

$$C_{pl} = C_{loss} [(1 - \eta^+) g_{bat}^+ + (1 - \eta^-) g_{bat}^-] \quad (4)$$

式中:  $C_B$  为电池储能系统总损耗成本;  $C_{bl}$  为电池寿命损耗成本;  $C_{O\&M}$  为电池运维成本;  $C_{pl}$  为电池能量损耗成本;  $C$  为储能电池初始投资费用;  $Q$  为储能电池输出容量;  $a, b$  为寿命成本参数;  $Q_N$  为储能电池额定容量;  $C_m$  为电池维护成本系数;  $P_{bat, rat}$  为电池额定功率;  $g_{bat}^+, g_{bat}^-$  分别为单位电池内电池的充电量和放电量;  $C_o$  为电池运行成本系数;  $C_{loss}$  为电池能量损失成本系数;  $\eta^+, \eta^-$  分别为电池的充电和放电效率。

### 2.2 可中断负荷的成本模型

可中断负荷的成本包括可中断容量成本和中断电量成本<sup>[24-25]</sup>,即:

$$C_{IL} = C_{ILck}^* + C_{ILk,t} \quad (5)$$

其中:

$$C_{ILck}^* = C_{ILck} Q_{ILck} \quad (6)$$

$$C_{ILk,t} = \sum (C_{ILk0,t} Q_{ILk,t}) \quad (7)$$

式中:  $C_{IL}$  为可中断负荷的中断成本;  $C_{ILck}^*$  为可中断容量成本;  $C_{ILk,t}$  为中断电量成本;  $C_{ILck}$  为对可中断负荷用户  $k$  的电价折扣;  $Q_{ILck}$  为可中断负荷用户  $k$  的可中断容量;  $C_{ILk0,t}$  为可中断负荷用户  $k$  在  $t$  时段的单位削减成本;  $Q_{ILk,t}$  为用户  $k$  的  $t$  时段的负荷削减量。

### 2.3 波动因子

分布式新能源自身的不可控性会严重影响新能源发电并网的稳定性,为了有效保证 VPP 能安全稳定地向电网输送电能,引入波动因子参数来衡量 VPP 输出稳定性。文中使用 VPP 出力的标准差来定义波动因子参数,标准差是反映一组数据离散程度最常用的一种量化形式,是衡量精确度的重要指标。从定义上看,如果波动因子参数的数据离散程度越高,稳定性越差;反之,稳定性越好。波动因子参数的表达式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t - \mu)^2} \quad (8)$$

式中:  $\sigma$  为波动因子参数;  $P_t$  为  $t$  时刻 VPP 向电网输送的有功功率;  $\mu$  为  $T$  时间段内 VPP 向电网输送的有功功率的平均值。

### 2.4 基于波动因子的奖惩机制

为了保证波动因子参数  $\sigma$  的有效性,引入基于波动因子的奖惩机制。当波动因子参数控制在某一个较小数值的区间范围内时,说明 VPP 向电网输送电能的稳定性较好, VPP 将会得到一定来自电网的奖励;反之,当波动因子参数在一个较大数值的区间范围波动时,说明 VPP 向电网输送电能的稳定性较差, VPP 将会受到一定的惩罚。波动因子奖惩值表示为:

$$f(\sigma) = \begin{cases} 3\sigma\mu & \sigma \leq 0.7\sigma_0 \\ -6\sigma\mu & \sigma > 0.7\sigma_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\sigma_0$  为 VPP 未协调控制前分布式新能源向电网输送电能的初始标准差。

## 3 考虑新能源消纳的 VPP 优化调度模型

### 3.1 目标函数

以储能装置的充/放电功率和可中断负荷作为

有效调控资源,考虑电池储能系统损耗成本及可中断负荷成本,通过最大化消纳可再生能源资源来实现 VPP 的最优经济效益。目标函数为:

$$\max R = \sum_{t=1}^T [P_t \lambda_{D,t} + \lambda_{L,t} (P_{L,t} - P_{IL,t}) - C_B - C(P_{IL,t}) + f(\sigma)] \quad (10)$$

其中:

$$P_t = \sum_{i=1}^{N_w} P_{wi,t} + \sum_{j=1}^{N_p} P_{pj,t} - (P_{L,t} - P_{IL,t}) - P_{battery,t} \quad (11)$$

$$C(P_{IL,t}) = \sum_{k=1}^{N_{IL}} (C_{ILck,t} Q_{ILck,t} + C_{ILk0,t} Q_{ILk,t}) \Delta t \quad (12)$$

式中: $R$ 为VPP整体的净利润; $T$ 为新能源消纳的时间段,取24h; $P_t$ 为VPP向电网输送的电能; $N_w$ 为风力发电厂的个数; $N_p$ 为光伏电站的个数; $P_{wi,t}$ 为风电场*i*在*t*时段的有功出力; $P_{pj,t}$ 为光伏电站*j*在*t*时段的有功出力; $\lambda_{D,t}$ 为*t*时段的日前电价; $\lambda_{L,t}$ 为*t*时段的内部负荷供电电价; $P_{L,t}$ 为*t*时段的内部负荷的消耗量; $P_{IL,t}$ 为*t*时段的可中断负荷调用值; $C_B$ 为电池储能系统的总损耗成本; $C(P_{IL,t})$ 为可中断负荷在*t*时段的调用成本; $N_{IL}$ 为可中断负荷组数; $C_{ILck,t}$ 为可中断负荷用户*k*在*t*时段的电价折扣; $Q_{ILck,t}$ 为可中断负荷用户*k*在*t*时段的可中断容量; $C_{ILk0,t}$ 为可中断负荷用户*k*在*t*时段单位削减成本; $Q_{ILk,t}$ 为用户*k*的*t*时段负荷削减量。

### 3.2 约束条件

(1) 可中断负荷调用约束条件。

$$P_{IL,\min,t} \leq \sum_{k=1}^{N_{IL}} S_{ILk,t} P_{ILk} \leq P_{IL,\max,t} \quad (13)$$

式中: $P_{IL,\min,t}$ ,  $P_{IL,\max,t}$ 分别为*t*时段可中断负荷的调用容量上、下限; $S_{ILk,t}$ 为可中断负荷*k*在*t*时段的调用状态,为0表示可中断负荷*k*在*t*时段没有被调用,为1表示可中断负荷*k*在*t*时段被调用; $P_{ILk}$ 为可中断负荷*k*的调用容量。

(2) 电池储能系统的约束条件。

$$g_{b,\min} \leq g_{b,t} \leq g_{b,\max} \quad \forall b \in B \quad (14)$$

$$u_{b,t} + v_{b,t} \leq 1 \quad (15)$$

$$0 \leq g_{b,t}^+ \leq \delta_b^+ u_{b,t} \quad (16)$$

$$0 \leq g_{b,t}^- \leq \delta_b^- v_{b,t} \quad (17)$$

$$g_{b,t} = g_{b,t-1} + \eta_b^+ g_{b,t}^+ - \frac{1}{\eta_b^-} g_{b,t}^- \quad (18)$$

式中: $g_{b,t}$ 为第*t*个时段结束后存储在电池*b*中的能量; $g_{b,\min}$ 为单个电池的最小储能容量; $g_{b,\max}$ 为单个电池的最大储能容量; $B$ 为储能电池集合; $u_{b,t}$ ,  $v_{b,t}$

为二进制变量, $u_{b,t} = 1$ 表示电池*b*处于充电状态, $v_{b,t} = 1$ 表示电池*b*处于放电状态; $g_{b,t}^+$ 为第*t*个时段内充入电池*b*的能量; $g_{b,t}^-$ 为第*t*个时段内从电池*b*放出的能量; $\delta_b^+$ 为在一个时段内能充入电池*b*的最大能量; $\delta_b^-$ 为在一个时段内从电池*b*放出的最大能量; $\eta_b^+$ 为电池*b*的充电效率; $\eta_b^-$ 为电池*b*的放电效率。

## 4 算例分析

### 4.1 算例介绍

建立一个VPP,其中包括1个风电场,1个光伏电站,负荷(含可中断负荷)和储能4种分布式组成单元。VPP中的风力出力曲线如图2所示,光伏出力曲线如图3所示,内部负荷曲线如图4所示。

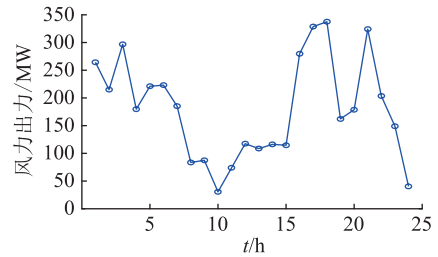


图2 VPP 风力出力曲线

Fig.2 Wind power output curve of VPP

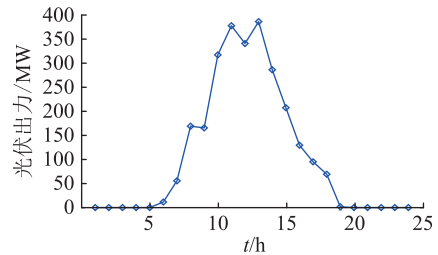


图3 VPP 光伏出力曲线

Fig.3 Photovoltaic power output curve of VPP

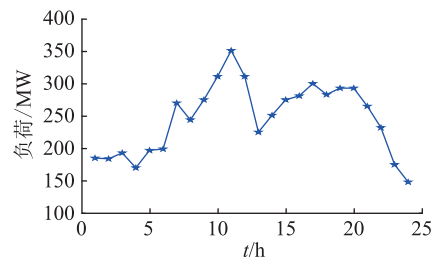


图4 VPP 内部负荷曲线

Fig.4 Internal load curve of VPP

VPP 内部负荷供电电价和 VPP 卖给电网的电能都采用固定电价,如购电价格 490 元/(MW·h),售电价格 380 元/(MW·h),可中断负荷的参数信息如表 1 所示。在储能系统中,电池储能系统容量为

300 MW·h,初始状态时电池深度为 0,建设成本为 4 500 元/(MW·h),充电效率为 0.87,寿命成本参数  $a=1\ 534, b=2.4$ ,运维成本为 59 元/(MW·h),能量损失为 25.3 元/(MW·h),储能电池剩余电量的上、下限分别为 300 MW·h 和 0。

表 1 可中断负荷参数信息

Table 1 Parameter information of interruptible load		
投入容量上限/MW	备用优惠	中断电价/[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]
<40	0	70
40~80	0.05 倍电价	70
>80	0.1 倍电价	70

### 4.2 优化结果及分析

根据文中所提出的模型,采用粒子群算法对其求解,以验证文中所提模型的可行性和波动因子有效性。其中,粒子群算法参数设置为:种群规模为 100,最大迭代次数为 300,惯性权重因子  $w$  为 0.7,学习因子  $C_1, C_2$  均为 2.05。寻优结果如图 5 所示,可以看出,大约迭代 80 次左右收敛,最终得到的总收益利润最大为 1 745 834 元。

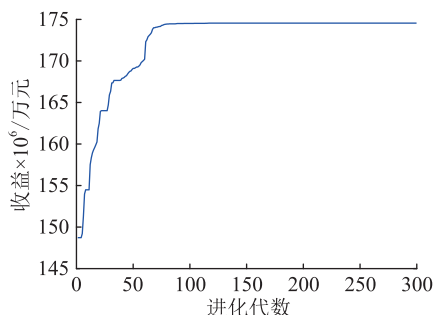


图 5 总收益进化过程

Fig.5 Evolution of total revenue

当 VPP 利润最优时,可中断负荷和储能系统一天内各个时刻的调用情况如图 6 所示,图中可中断负荷的取值代表本小时本中断的负荷功率,储能系统状态则代表充放电功率,正半轴为充电状态,负半轴为放电状态。调用中断负荷和储能系统放电,意味着新能源发电不足或内部总负荷增加,而储能系统充电则意味着新能源发电过剩,若全部输出到电网可能引起 VPP 输出功率波动过大。

图 7 为加入波动因子前和加入波动因子后 VPP 一天内各个时刻向电网输送功率的变化曲线。可以看出,加入波动因子后,出力变化曲线明显变得平缓,说明了引入波动因子的有效性。图 7 中引入波动因子前的曲线出现负值的原因是 VPP 具有“源荷”双重性,既可以作为电源向电网供电,又可以作为负荷向电网购买电能。

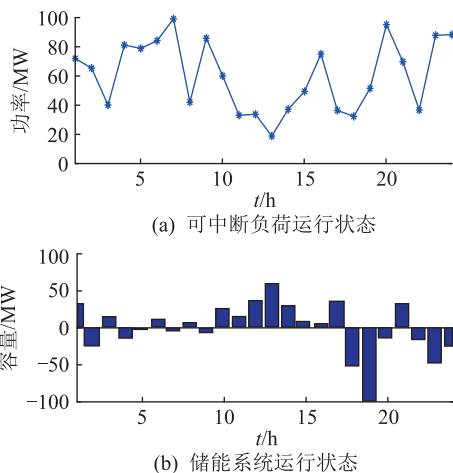


图 6 可中断负荷和储能系统调度状态

Fig.6 Dispatching states of interruptible load and energy storage system

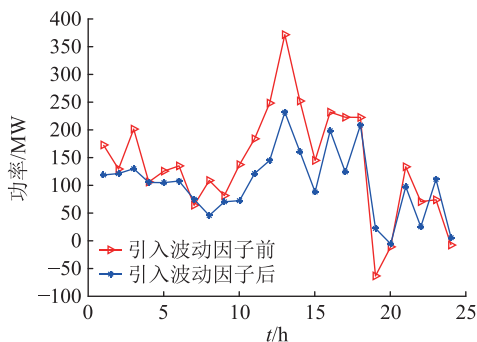


图 7 VPP 并网功率的变化曲线

Fig.7 Variatio curve of grid-connected power of VPP

## 5 结论

文中构建了基于 VPP 的分布式能源消纳优化调度模型,此模型把储能系统和可中断负荷作为调度资源,在考虑储能系统和可中断负荷调度成本的基础上,引入波动因子参数并对其大小所属区间采取相应的奖惩机制来保证 VPP 出力稳定性,同时以 VPP 总体收益最大为目标进行优化。采用粒子群算法进行寻优,结果表明:(1) 电池储能系统成本模型不仅应考虑寿命成本,即安装成本,还应考虑运维成本和能量损失成本;(2) 引入波动因子来衡量输出稳定性,可以在一定程度上降低新能源出力的不确定性对电网造成的影响,并提高新能源消纳的水平;(3) 不可控新能源大规模入网时,通过可中断负荷和储能系统联合运行,可以弥补彼此的局限性和成本代价,使 VPP 获得良好的经济效益,提高电网的电能质量。

### 参考文献:

[1] 高泽,杨建华,冯语晴,等. 新能源发电现状概述与分析[J]. 中外能源,2014,19(10):31-36.

- GAO Ze, YANG Jianhua, FENG Yuqing, et al. New energy-based power generation today and analysis[J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(10):31-36.
- [2] 雷金勇,李战鹰,卢泽汉,等. 分布式发电技术及其对电力系统影响研究综述[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4):46-50.  
LEI Jinyong, LI Zhanying, LU Zehan, et al. Review on the research of distributed generation technology and its impacts on electric power systems[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4):46-50.
- [3] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):1-9.
- [4] 杨肖虎,罗剑波,郁琛,等. 适应大规模新能源并网的电力系统备用配置及优化综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1):10-20, 63.  
YANG Xiaohu, LUO Jianbo, YU Chen, et al. Review of power system reserve configuration and optimization for large-scale renewable energy integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1):10-20, 63.
- [5] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16):1-8, 25.  
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):1-8, 25.
- [6] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13):1-9.  
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13):1-9.
- [7] 陈炜. 含电动汽车储能与分布式风力发电的虚拟发电厂优化运行[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10):45-50, 59.  
CHEN Wei. Optimal operation of virtual power plant with electric vehicles and distributed wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10):45-50, 59.
- [8] 洪博文,李琼慧,何永胜,等. 虚拟电厂在分布式光伏发电应用示范区中的应用及前景[J]. 电力建设, 2017, 38(9):32-37.  
HONG Bowen, LI Qionghui, HE Yongsheng, et al. Applications and prospect of virtual power plant in distributed photovoltaic generation application demonstration area[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9):32-37.
- [9] 刘吉臻,李明扬,房方,等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5103-5111.  
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5103-5111.
- [10] 夏榆杭,刘俊勇. 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4):100-106, 115.  
XIA Yuhang, LIU Junyong. Review of virtual power plant based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4):100-106, 115.
- [11] PUDJIANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1):10.
- [12] 苑仁峰,艾芊. 虚拟发电厂技术探讨[J]. 电器与能效管理技术, 2014(9):33-38, 63.  
YUAN Renfeng, AI Qian. Technical discussion of virtual power plant[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(9):33-38, 63.
- [13] 姜海洋,谭忠富,胡庆辉,等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J]. 中国电力, 2010, 43(6):37-40.  
JIANG Haiyang, TAN Zhongfu, HU Qinghui, et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry[J]. Electric Power, 2010, 43(6):37-40.
- [14] ROYAPOOR M, PAZHOOHESH M, DAVISON P J, et al. Building as a virtual power plant, magnitude and persistence of deferrable loads and human comfort implications[J]. Energy and Buildings, 2020, 213:109794.
- [15] NAVAL N, SANCHEZ R, YUSTA J M. A virtual power plant optimal dispatch model with large and small-scale distributed renewable generation[J]. Renewable Energy, 2020, 151:57-69.
- [16] 周任军,邓子昂,徐健,等. 碳循环利用的风电-P2G-碳捕集-燃气热电虚拟电厂优化运行[J/OL]. 中国电力:1-9[2020-03-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200313.1529.010.html>.  
ZHOU Renjun, DENG Zi'ang, XU Jian, et al. Optimal operation of wind power, P2G, carbon capture and gas thermoelectric virtual power plant for carbon recycling[J/OL]. China Power: 1-9[2020-03-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200313.1529.010.html>.
- [17] EMARATI M, KEYNIA F, RASHIDINEJAD M. A two-stage stochastic programming framework for risk-based day-ahead operation of a virtual power plant[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(3):1-13.
- [18] MELLAL M A, ZIO E. An adaptive particle swarm optimization method for multi-objective system reliability optimization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019, 233(6):990-1001.
- [19] 陈炜,艾欣,范滢丹. 基于模仿者动态算法的虚拟发电厂内部分布式发电资源均衡调度方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3):589-595.  
CHEN Wei, AI Xin, FAN Yingdan. Replicator dynamics algorithm based equilibrium dispatching strategy for distributed energy resources in virtual power plant[J]. Power System Technology, 2014, 38(3):589-595.
- [20] 张小敏. 虚拟发电厂在大规模风电并网中的应用[J]. 电力建设, 2011, 32(9):11-13.  
ZHANG Xiaomin. Application of virtual power plant on large-scale wind power grid integration[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(9):11-13.

- [21] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):92-102.  
 YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):92-102.
- [22] 王天旺,高贇,姜孟,等. 虚拟电厂下计及分布式风电与储能系统的电力系统优化调度[J]. 电力建设,2016,37(11):108-114.  
 WANG Tianwang, GAO Yun, JIANG Meng, et al. Power system optimal scheduling including distributed wind power and energy storage system via virtual power plant[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(11):108-114.
- [23] 陈刚,包宇庆,张金龙,等. 计及寿命损耗成本的储能单元分布式协同控制策略[J]. 电网技术,2018,42(5):1495-1501.  
 CHEN Gang, BAO Yuqing, ZHANG Jinlong, et al. Distributed cooperative control strategy for energy storage units considering life loss cost [J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1495-1501.
- [24] 艾欣,周树鹏,赵阅群. 基于场景分析的含可中断负荷的优化调度模型研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(S1):25-31.  
 AI Xin, ZHOU Shupeng, ZHAO Yuequn. Research on optimal dispatch model considering interruptible loads based on scenario analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1):25-31.
- [25] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):30-38.  
 LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1):30-38.

作者简介:



徐天奇

徐天奇(1978),男,博士,教授,研究方向为智能电网,新能源发电并网,新能源消纳等(E-mail:xu.tianqi@gmail.com);

田业(1994),男,硕士在读,研究方向为配电网保护与控制,配电网金具优化;

高鑫(1996),女,硕士,助理工程师,从事智能电网,新能源消纳相关工作。

## Optimal dispatching of virtual power plant with new energy power generation full consumption and friendly integration into power grids

XU Tianqi<sup>1</sup>, TIAN Ye<sup>1</sup>, GAO Xin<sup>2</sup>, LI Hongkun<sup>2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China;

2. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330001, China)

**Abstract:** Virtual power plants integrate distributed power generations into a whole to feed power to the grid by utilizing advanced technologies such as intelligent measurement, network communication, and intelligent decision-making, which is expected to become a supporting framework for large-scale new energy generation integrating into grids. The goal of the virtual power plant constructed is to maximize the economic benefits of grid-connection. At the same time, considering the adverse effects of the uncertainty of new energy output on the power grid, fluctuation factor parameters and mechanism for reward or punishment are introduced to limit the fluctuation of grid-connection power. On this basis, the energy storage system and interruptible load are used as scheduling resources to consume the new energy power generation completely. Finally, the particle swarm algorithm is used for optimizing under the constraints. The calculation results show that the method can effectively suppress the fluctuation of the grid-connected power virtual power plant on the basis of consuming all the new energy generation, and greatly improve the friendliness of new energy access.

**Keywords:** virtual power plant; distributed generation; maximum economic benefit; fluctuation factor; reward or punishment mechanism; fluctuation of grid-connected power

(编辑 钱悦)