

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181559

资源聚合商模式下的分布式电源、储能与 柔性负荷联合调度模型

袁晓冬¹, 费骏韬¹, 胡波², 张友旺³, 葛乐³

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国网苏州市吴江区供电公司, 江苏 苏州 215200; 3. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 分布式电源、储能、柔性负荷等分布式资源数量众多、布局分散, 难以直接被电网调度。资源聚合商可通过内部整合各类分布式资源执行电网调度指令。基于资源聚合商运行模式, 建立了结合大容量资源直接调度与小容量资源电价响应间接调度的联合调度模型。在此基础上, 以资源聚合商利润最大为优化目标, 对大容量资源调度性能差异进行滚动在线评估, 设置动态综合调度优先级。针对小容量资源间接调度的不确定性, 提出了包含模糊参数的机会调度约束。应用改进的粒子群算法将模糊机会约束清晰化并求解调度模型。基于 IEEE33 节点配电网, 验证了所提模型和算法的有效性和科学性。

关键词: 资源聚合商; 联合调度; 动态综合调度优先级; 模糊机会约束; 改进粒子群算法

Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode

YUAN Xiaodong¹, FEI Juntao¹, HU Bo², ZHANG Youwang³, GE Le³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Suzhou Wujiang Power Supply Company, Suzhou 215200, China;

3. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Distributed generation, energy storage, flexible load and other distributed resources are numerous and scattered, making it difficult to be directly scheduled by the power grid. Resource aggregators can execute power grid scheduling instructions by integrating various distributed resources internally. Based on the resource aggregator operation mode, a joint scheduling model for direct scheduling of large-capacity resources and indirect scheduling of electricity price response of small-capacity resources is constructed. On this basis, the resource aggregator's profit is the maximum scheduling goal, and the scheduling performance difference of large-capacity resources is evaluated by rolling online, and the dynamic integrated scheduling priority is set. In view of the uncertainty of indirect scheduling of small capacity resources, an opportunistic scheduling constraint with fuzzy parameters is proposed. The improved particle swarm optimization algorithm is applied to clarify the fuzzy chance constraints and solve the scheduling model. Combining with IEEE33 node distribution network, the validity and scientific nature of the proposed model and algorithm are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707089), Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5210EF17001C), and State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.

Key words: resource aggregator; joint scheduling; dynamic integrated scheduling priority; fuzzy opportunity constraints; improved particle swarm optimization

0 引言

长期以来, 电网主要通过调度电源侧(集中式

发电厂)来满足调峰、调频等要求。随着新能源的大量接入, 传统电厂年利用小时数被迫下降, 承担的电网调节压力陡增^[1]。电网陷入了不确定性不断增大、调节能力却不断减弱的怪圈。解决这一困局的一个有效手段是协同海量分布式资源主动参与电网调控, 使其从电网的“沉重负担”转变为支撑电网安全高效运行的海量“参与者”。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707089); 国网总部科技项目资助(5210EF17001C); 国网江苏省电力有限公司科技项目资助

配电网未来将包含大量的分布式电源、储能和柔性负荷等资源,均具备参与电网调节的能力,通过合理的方式聚合调度,不仅能够平抑间歇性能源波动和降低系统峰谷差,而且与增加装机容量相比,投资成本低,具有良好的社会效益和经济效益^[2]。因此,客观上需要将数量庞大的分布式资源整合为一个或多个调度方式灵活的聚合体。然而分布式资源数量众多、容量不均、布局分散,通过电网调度中心直接调度成本过高,难以直接被电网调度,需要一种新的调度模式。

文献[3]给出负荷聚合商的定义,指出负荷聚合商的作用是调度柔性负荷并向独立系统运营商提供需求削减负荷。文献[4-5]在负荷聚合商模式下分别对柔性负荷的预测模型和聚合调度方式进行分析。文献[6]对负荷聚合商定义进行扩展,将可调负荷、储能和分布式电源纳入负荷聚合商调度范围,并对整合方法和运营机制进行综述分析。文献[7]表明扩展的负荷聚合商调度范围不止柔性负荷层面,明确提出了资源聚合商的定义。本文引入资源聚合商的概念,研究在资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型及求解算法。

文献[8]提出一种基于模型预测控制算法的公寓式储能与分布式电源聚合方式,并在节约电费和资源互补等方面表现出良好性能,但其聚合区域限制在公寓,资源数量较少,在大范围配电网层面不完全适用。文献[9]研究利用能量管理系统将控制大型储能设备,与波动的光伏电站聚合形成输出功率可调的聚合方法,但其未涉及数量众多的小容量资源的聚合方式。文献[10]以各类分布式资源聚合调度为目的,计及购电成本、损耗成本和管理成本,建立了以配电网运行成本最低为目标的经济调度模型,但未考虑各类分布式资源供电能力的影响,特别是对于储能等存在容量限制的资源而言,易出现特定时刻调度能力不足的状况。文献[11]应用蒙特卡洛算法解决小容量资源调度过程中的不确定性问题,通过大量模拟数据得出调度量,但计算时间相对较长,不适合运用在实时调度过程。

本文以资源聚合商调度模式为基础,构建结合大容量资源的直接调度与小容量资源电价响应的联合调度的联合调度模型。以资源聚合商盈利最多为目标,以潮流、电压、各类资源出力等为约束条件。通过对大容量资源调度经济性、信用度以及供电能力进行评估,设置动态优先级进行调度;针对小容量资源间接调度的不确定性,提

出了包含模糊参数的机会调度约束。通过改进的IEEE33节点配电系统进行算例分析,验证调度模型和算法的有效性和科学性。

1 资源聚合商运营模式

电网公司以电网调节为目的,向资源聚合商发布调度指令,资源聚合商通过内部优选,联合调度各类分布式资源完成调度指令,主要调度方式为直接调度和电价响应的间接调度,运营模式如图1所示,其中虚线框内为本文重点研究内容。

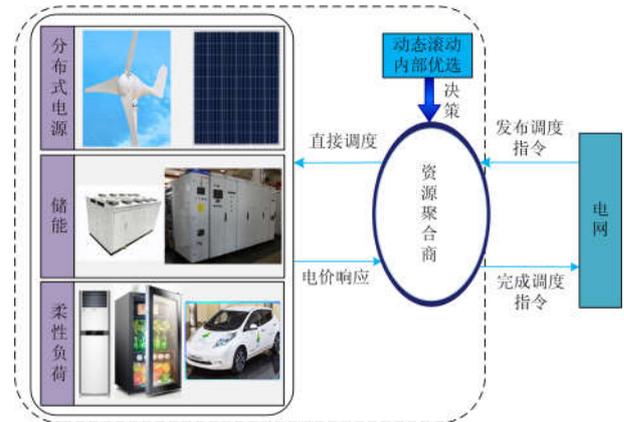


图1 资源聚合商运营模式

Fig. 1 Operation model of resource aggregator

1.1 聚合商接受电网调度模式

电网公司依据调峰、调频、调压、缓解网络阻塞等为目的,直接向资源聚合商发布调度指令,并根据指令完成量给予相应的经济激励。资源聚合商通过内部决策各资源调度量完成调度指令,若未完成调度指令,则根据未完成量付出相应的经济赔偿。资源聚合商作为受控节点,接受电网调度指令方面研究较多^[5-6],不作为本文研究重点。

1.2 聚合商内部调度模式

资源聚合商可调度资源主要分为三种:分布式电源、储能以及柔性负荷。将各类分布式资源按容量分为大容量资源与小容量资源两类。

大容量储能以及柔性负荷调度准确性较高,可视作精确调度;大容量分布式电源的调度准确性与资源预测精度有关,现有的日内15min出力预测误差在7%左右^[12],已能保证新能源出力预测的精确度,因此假定对调度结果影响较小。鉴于大容量资源调度相对精确,并且资源数目少,采取直接调度的形式。资源聚合商与相关资源持有者签订合同,给予一定的经济激励,建立大容量资源的直接调度模型。大容量资源的经济激励包括两部分,一是依据各类大容量资源的调度量计

算的调度激励, 与实时调度量成正比; 二是各类资源的调度权订购激励, 按资源容量计算, 为固定值, 计入资源聚合商固定运行成本。

小容量资源数量众多, 响应行为具有较大分散性和不确定性, 难以被直接调度, 可以通过改变电价使其自愿响应, 以达到资源间接调度的目的。按节点对小容量资源进行整合间接调度, 将其视作“虚拟柔性负荷”, 即类似于柔性负荷作为负荷的一部分考虑。在小容量资源调度过程中, 资源聚合商通过改变小容量资源电价的形式间接调度资源, 资源响应度随电价变化而变化, 资源聚合商根据实际资源响应量向小容量资源持有者付出经济激励。

2 联合调度模型

以资源聚合商收益最大为目标, 计及聚合区内的潮流、电压、各类分布式资源的调度容量、储能剩余电量等约束, 建立资源聚合商模式下的各类分布式资源联合调度模型。

2.1 目标函数

将一天 24 小时划分为 96 个时间段, 以日利润最大建立目标函数:

$$\begin{cases} F = \max \sum_{t=1}^{96} [f_{in}(t) - f_{out}(t)] \\ f_{in}(t) = K_1 P_{done}(t) - K_2 P_{lack}(t) \\ f_{out}(t) = f_B(t) + f_S(t) + f_0 \\ f_B(t) = \sum_{m=1}^M K_{3m} P_{cm}(t) \\ f_S(t) = \sum_{n=1}^N K_{4n}(t) \xi_{ln}(t) P_{ln}(t) \\ f_0 = \sum_{m=1}^M K_{5m} C_{cm} + f_{RA} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为资源聚合商日利润最大值; $f_{in}(t)$ 为 t 时段资源聚合商依据电网公司调度指令的完成量获取的收入; $f_{out}(t)$ 为资源聚合商为调度资源给予各类资源持有者的支出; K_1 为已完成调度量的结算单价; $P_{done}(t)$ 为 t 时段资源聚合商完成的调度量; K_2 为未完成调度量的赔偿单价; $P_{lack}(t)$ 为 t 时段资源聚合商未完成的调度量, 其中 $P_{done}(t) + P_{lack}(t) = P_{all}(t)$, $P_{all}(t)$ 为 t 时段电网公司下达的调度指令值; $f_B(t)$ 为 t 时段调度大容量资源调度量成本; $f_S(t)$ 为 t 时段调度小容量资源调度量成本; f_0 为资源聚合商固定运行总成本; K_{3m} 为大容量资源 m 的调度成本单价; $P_{cm}(t)$ 为 t 时段调

度大容量资源 m 的调度量; $K_{4n}(t)$ 为 t 时段节点 n 小容量资源调度成本单价; $\xi_{ln}(t)$ 为 t 时段节点 n 小容量资源的响应度, 为实际响应量与最大响应量之间的比值; $P_{ln}(t)$ 为 t 时段按节点 n 分类的小容量资源的最大响应量, 其中, $\sum_{m=1}^M P_{cm}(t) + \sum_{n=1}^N \xi_{ln}(t) P_{ln}(t) = P_{done}(t)$; K_{5m} 表示大容量资源 m 的调度权订购成本; C_{cm} 表示大容量资源 m 的容量; f_{RA} 表示资源聚合商的固定运行成本。

2.2 约束条件

1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功和无功功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导和电纳; $\cos \theta_{ij}$ 和 $\sin \theta_{ij}$ 分别为相角差 θ_{ij} 的余弦和正弦。

2) 节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (3)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压; $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 分别为电压上下限。

3) 各类分布式资源功率约束

实际调度资源总量不能超过资源最大容量。分布式电源、储能以及柔性负荷存在调度功率极限约束如式(4)所示。

$$\begin{cases} P_{DG,x}^{\min} \leq P_{DG,x} \leq P_{DG,x}^{\max} \\ P_{ESS,y}^{\min} \leq P_{ESS,y} \leq P_{ESS,y}^{\max} \\ P_{FL,z}^{\min} \leq P_{FL,z} \leq P_{FL,z}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{DG,x}$ 为分布式电源 x 的有功出力; $P_{DG,x}^{\max}$ 和 $P_{DG,x}^{\min}$ 分别表示分布式电源 x 的出力上下限; $P_{ESS,y}$ 为储能 y 的有功出力; $P_{ESS,y}^{\max}$ 和 $P_{ESS,y}^{\min}$ 分别表示储能 y 的充放电功率上下限; $P_{FL,z}$ 为柔性负荷 z 的有功出力; $P_{FL,z}^{\max}$ 和 $P_{FL,z}^{\min}$ 分别表示柔性负荷 z 的出力上下限。

4) 储能荷电状态约束及能量平衡约束

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (5)$$

式中: SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别为储能电池充放电深度上下限。SOC 的定义为

$$SOC = \frac{E}{E_{\text{rate}}} \quad (6)$$

式中： E 为储能电池当前能量值； E_{rate} 为额定能量值。在整个调度日，要保证储能装置的能量守恒^[13]。

$$E_{\text{Ess},y}(0) = E_{\text{Ess},y}(96) \quad (7)$$

式中： $E_{\text{Ess},y}(0)$ 为储能装置储备的初始能量； $E_{\text{Ess},y}(96)$ 为调度周期结束时储能的剩余能量。

潮流、资源出力以及状态约束是电网及资源聚合商运行最基本的约束，实际调度过程中还需要对模型进行进一步处理。大容量资源调度方式均为直接调度，但各资源性能存在差异，需要确定资源的调度次序。依据大容量资源调度性能综合差异设立动态综合调度优先级^[14]，依次进行调度。小容量资源依据电价进行间接调度，电价与响应量之间存在相关性，但响应过程是基于资源持有者的自愿原则开展，容易受到其他非电价因素的影响，具备较大模糊性，需建立模糊机会约束表征间接调度不确定性^[15]。

3 模型处理及求解

3.1 动态综合调度优先级

传统大容量资源调度方式为经济调度，以购电成本和管理成本等评估调度经济性并依次进行调度^[10]。本文设置动态综合调度优先级的调度方式，分时段针对调度经济性、信用度以及供电能力建立评估指标，结合形成综合指标并确立综合调度优先级。

1) 引入经济性评估指标来衡量资源调度成本差异。经济性是判断优先级的主要方面，可以直接通过大容量资源持有者与电网公司签订的合同获得(不计调度权订购成本)：

$$D_{m,1}(t) = A \cdot \frac{1}{K_{3m}} \quad (8)$$

式中： $D_{m,1}(t)$ 为 t 时段资源 m 的调度经济性的评估指标； A 为某一常数，使得调度成本最低的资源经济性为1； K_{3m} 为定值，故调度经济性为常量。

2) 引入信用度的概念用于表征一定时段内资源参与调度的完成情况。该指标以历史信息作为计算数据来源。

$$D_{m,2}(t) = \frac{1}{G_m} \sum_{g=1}^{G_m} (P_{m,r}^g / P_{m,e}^g) \quad (9)$$

式中： $D_{m,2}(t)$ 为 t 时段资源 m 信用度的评估指标；

G_m 为一定时间段资源参与调度的次数； $P_{m,r}^g$ 为资源 m 实际调度量； $P_{m,e}^g$ 为资源 m 预期调度量。对于储能以及柔性负荷直接调度而言，不存在不确定问题，调度值与预期值相等，故其信用度为1。

3) 引入供电能力评估指标来量化大容量资源的可调度潜力。影响供电能力的主要因素有剩余并网时间及当前时刻可调度功率，具体表示为

$$D_{m,3}(t) = \frac{T_{m,rc}(t)}{T_{m,all}(t)} \cdot \frac{P_{m,max}(t)}{P_{max}(t)} \quad (10)$$

式中： $D_{m,3}(t)$ 为 t 时段某个大容量资源 m 的供电能力的评估指标； $T_{m,rc}(t)$ 、 $T_{m,all}(t)$ 分别为其剩余并网时间及总的并网时间； $P_{m,max}(t)$ 、 $P_{max}(t)$ 分别为当前时刻大容量资源 m 的可调度功率、大容量资源中的最大可调度功率。

为了使动态综合调度优先级评估结果更加合理，基于层次分析——熵权法^[16-17]，融合了层次分析法以及熵权法，从主观和客观两个方面确定各项指标的综合权重为

$$\lambda_{cm,q} = \frac{\lambda_{\text{AHP},q} + \lambda_{\text{EM},q}}{\sum_{q=1}^3 (\lambda_{\text{AHP},q} + \lambda_{\text{EM},q})} \quad (11)$$

式中， $\lambda_{cm,q}$ 、 $\lambda_{\text{AHP},q}$ 、 $\lambda_{\text{EM},q}$ 分别为第 q 个指标综合权重、层次分析法权重及熵权法权重。

根据各项指标值及综合权重确立综合指标值，进一步确立各类资源调度优先级，大容量资源 m 在 t 时段的综合指标值 $f_{\text{DSP}}^m(t)$ 可表示为

$$f_{\text{DSP}}^m(t) = \sum_{q=1}^3 [\lambda_{cm,q} D_{m,q}(t)] \quad (12)$$

式中： $D_{m,q}(t)$ 为 t 时段大容量资源 m 的第 q 个评估指标。

3.2 模糊机会约束

当前，解决小容量资源调度不确定性问题的主要方法分为概率统计以及模糊数学两大类。蒙特卡洛模拟属于概率统计的内容，依据历史数据经过多次模拟得出概率分布，利用概率分布解决随机性问题^[11]；本文选用的模糊机会约束属于模糊数学的内容，依据历史数据构造隶属度函数表征模糊性。

在实时电价的激励下，小容量资源持有者自发调度资源，调度过程考虑式(4)一式(7)的功率以及储能状态约束。根据历史电价实施前后虚拟柔性负荷实测数据拟合小容量资源响应度 $\xi_m(t)$ 与实时电价 $k(t)$ 的关系^[10,18]，得出两端响应度存在截止上下限，中间段近似线性的响应度曲线如式

(13)所示。

$$\xi_{ln}(t) = \begin{cases} 1 & , k(t) \leq k_0 \\ -ak(t) + b, k_0 \leq k(t) \leq k_1 \\ -1 & , k(t) \geq k_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: k_0 和 k_1 分别为响应度为 1 和 0 时的电价; a 和 b 为常数。调度过程只考虑 $k(t) \in [k_0, k_1]$ 部分。电价与响应量之间存在相关性, 但响应量是基于资源持有者的自愿原则开展, 具有较大不确定性, 故设置模糊参数表征调度不确定性, 利用模糊参数拟合虚拟柔性负荷表达式如式(14)。

$$\tilde{P}_{ln}(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{\lambda} \cdot \xi_{ln}(t) \cdot P_{ln}(t) \quad (14)$$

式中: $\tilde{P}_{ln}(t)$ 为模糊预测后的虚拟柔性负荷可调度量; $\tilde{\lambda}$ 为模糊参数。可推导出资源聚合商完成的调度量为

$$P_{\text{done}}(t) = \sum_{m=1}^M P_{cm}(t) + \tilde{P}_{ln}(t) \quad (15)$$

模糊参数三角形隶属度函数为

$$\mu(\tilde{\lambda}) = \begin{cases} \frac{\lambda_2 - \tilde{\lambda}}{\lambda_2}, 0 < \tilde{\lambda} \leq \lambda_2 \\ \frac{\tilde{\lambda} - \lambda_1}{-\lambda_1}, \lambda_1 < \tilde{\lambda} \leq 0 \\ 0, \tilde{\lambda} < \lambda_1 \text{ 或 } \tilde{\lambda} > \lambda_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mu(\tilde{\lambda})$ 为 $\tilde{\lambda}$ 的隶属度函数; λ_1 和 λ_2 为隶属度参数。

由于小容量资源的调度存在较大不确定性, 不能追求功率的绝对平衡。对于不满足平衡的情况, 可调用上级电网部分备用功率来应对。资源聚合商提供的调度量需要满足与电网公司签订的合约调度量, 允许在一定程度上不满足服务水平条件, 但满足的概率必须大于某一置信度, 由此产生机会约束如式(17)。

$$\Gamma \{P_{\text{done}}(t) \in [P_{\text{all}}(t) - \varepsilon, P_{\text{all}}(t) + \varepsilon]\} \geq \alpha \quad (17)$$

式中: Γ 表示概率; ε 为备用功率; α 为置信度, 由聚合商与电网公司签订的合约所定。

3.3 模型求解

3.3.1 模糊机会约束的清晰化

模型的求解本质是模糊机会约束的最优化问题, 根据不确定规划理论^[19-20]将模糊机会约束转化为相应的清晰等价类。当置信度 $\alpha > 1/2$ 时, 将机会约束清晰化:

$$\begin{cases} (2-2\alpha)\lambda_1 \tilde{P}_{ln}(t) + (2\alpha-1)\lambda_2 \tilde{P}_{ln}(t) + \\ \sum_{m=1}^M P_{cm}(t) - P_{\text{all}}(t) + \varepsilon \geq 0 \\ (2-2\alpha)\lambda_1 \tilde{P}_{ln}(t) + (2\alpha-1)\lambda_2 \tilde{P}_{ln}(t) + \\ \sum_{m=1}^M P_{cm}(t) - P_{\text{all}}(t) - \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

3.3.2 改进的粒子群算法

本文需要解决的问题是长时间尺度最优化问题, 智能算法中的粒子群算法^[21](Particle Swarm Optimization, PSO)在求解最优化问题方面具有易实现和收敛速度快的优点。考虑到资源调度的不确定性以及机会约束导致粒子的可行域不断变化, 常规的粒子群算法已不能满足要求。将模糊机会约束清晰化形成清晰等价类, 结合粒子群算法, 建立改进的粒子群算法, 在形成粒子群和求解最优策略的过程中随时判断粒子的可行性, 所有不满足清晰等价类约束的粒子都被舍弃并重新生成粒子, 粒子的位置与速度更新公式如下:

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest_i^k - x_i^k) \quad (19)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (20)$$

式中: v_i^k 表示粒子 i 在第 k 次迭代中的速度; x_i^k 表示粒子 i 在第 k 次迭代中的位置; $pbest_i^k$ 记录粒子 i 的历史最优位置; $gbest_i^k$ 记录全局粒子的历史最优位置; c_1 、 c_2 为加速系数, 分别表示个体和全局最优位置方向对粒子速度的影响程度; rand 会产生一个 $[0, 1]$ 之间的随机数; ω 为惯性权重, 既要能保证较快的收敛速度, 又要能防止种群的过早收敛。算法流程图如图 2 所示。

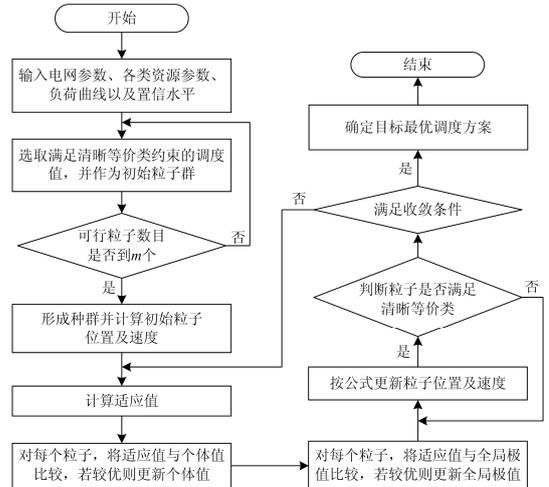


图 2 改进的粒子群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved particle swarm optimization

4 算例分析

4.1 算例设置

选取改进的 IEEE33 节点配电范围作为资源聚合区，线路结构如图 3 所示。系统额定电压为 10 kV，基准视在功率为 10 MVA，节点 1 为平衡节点，母线的电压为 $10.5\angle 0^\circ$ kV，线路参数参见附录 A 表 A1。

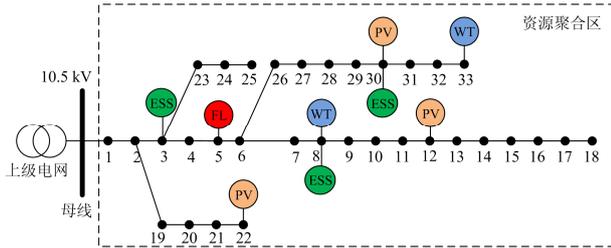


图 3 资源聚合区线路结构图

Fig. 3 Route structure diagram of resource aggregation area

资源聚合区内大容量资源配置参数及调度成本如表 1 所示，其中光伏和风电出力预测曲线参见附录 A 图 A1。各节点小容量资源最大功率及节点参数参见附录 A 表 A2。

表 1 大容量资源配置参数与调度成本

Table 1 Large-capacity resource configuration parameters and scheduling costs

资源	位置 (节点)	额定功率/容量	调度成本/ (元/MW·h)	订购成 本/元
光伏 1	12	0.4 MW	620	100
光伏 2	22	0.4 MW	310	608
光伏 3	30	0.3 MW	450	456
风电 1	8	0.4 MW	680	100
风电 2	33	0.3 MW	340	980
柔性负荷	5	0.5 MW	280	800
储能 1	3	0.8 MW/1.6 MW·h	500	100
储能 2	8	0.8 MW/3.2 MW·h	250	838
储能 3	30	0.8 MW/1.6 MW·h	375	500

设置 K_1 和 K_2 分别为 800 和 1600 元/MW·h， f_{SA} 为 1000 元，置信度 $\alpha=0.98$ ，备用功率 $\varepsilon=0.2$ MW。求解算法采用改进的粒子群法，算法参数设置为：粒子数 50，迭代次数 100，加速系数 $c_1=c_2=2$ ，通过多次试验得出 ω 的取值范围在 $[0.5, 1.1]$ ，算法具有较强的全局搜索能力，令 $\omega=1.1-n_{PSO} \cdot \frac{1.1-0.5}{N_{PSO}}$ ， n_{PSO} 和 N_{PSO} 分别为当前循环次数和总次数。算例分析资源聚合商的典型运行场景，场景中资源聚合商接受电网的调度指令如图 4 所示。

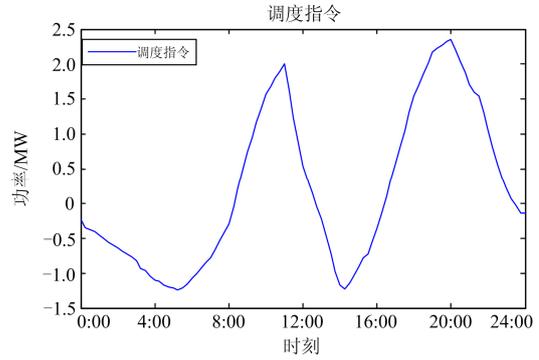


图 4 调度指令

Fig. 4 Scheduling instruction

4.2 计算结果与分析

为验证所提模型及算法的有效性和科学性，针对大容量资源的直接调度方式和小容量资源的不确定性问题处理两方面，分别进行对比分析。

4.2.1 直接调度方式对比分析

将本文基于综合调度优先级的调度方式与传统单纯经济调度方式^[10]在典型场景下进行了仿真对比，整个调度周期中调度指令及资源聚合商调度曲线如图 5 所示。

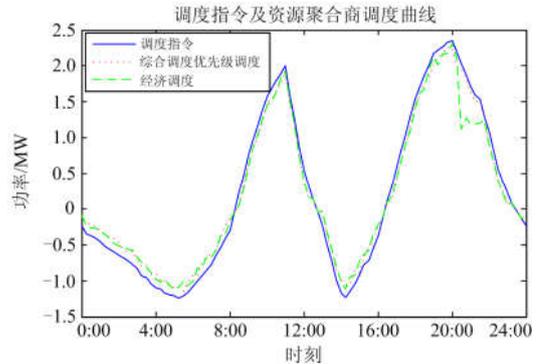


图 5 调度指令及资源聚合商调度曲线

Fig. 5 Scheduling instruction and resource aggregator scheduling curve

由图 5 可以看出，基于综合调度优先级的调度方式下，资源聚合商调度曲线与调度指令曲线契合度较高，完成了调度指令，日利润为 1034.2 元；而单纯经济调度方式下资源聚合商日利润 893.4 元，利润相对较少，主要是由于在 20:15—21:30 时段未能完成调度指令，需向电网付出相应经济赔偿，并且由于该时段电量缺额达到 0.57 MW·h，严重影响了电网稳定运行。说明基于综合调度优先级的调度方式能够实现资源聚合商利润最大，并且有效完成电网的调度指令。

针对经济调度方式在 20:15—21:30 时间段未能完成调度指令的问题, 选取 20:15—20:30 以及 20:45—21:00 时段对两种调度方式进行进一步分析, 资源调度的评估指标及调度情况如表 2 所示。由表 2 可以看出, 在不同时刻, 各类资源经济调度评估指标固定不变, 其调度次序也固定不变, 综合调度优先级评估指标随时间变化而变化, 其调度次序也随之改变。在 20:15—20:30 时段, 储

能资源 2 在综合调度优先级的调度方式下的调度量为 0.2 MW·h, 而在经济调度方式下的调度量为 0.03 MW·h, 参与调度量较少。在 20:45—21:00 时段, 储能资源在综合调度优先级的调度方式下的调度量为 0.32 MW·h, 而在经济调度方式下的调度量为 0。说明经济调度方式未完成调度指令的原因在于储能参与调度量较少, 两种调度方式下储能的剩余容量曲线如图 6 所示。

表 2 两种调度方式评估指标及调度情况

Table 2 Evaluation indicators and scheduling situation of two scheduling modes

评估指标/调度量/MW·h	风电 1	风电 2	柔性负荷	储能 1	储能 2	储能 3
20:15—20:30 综合调度优先级	0.726/0.034	0.873/0.026	0.957/0.13	0.572/0	0.762/0.2	0.631/0.2
20:15—20:30 经济调度	0.367/0.034	0.735/0.026	0.829/0.13	0.5/0	1/0.003	0.667/0.2
20:45—21:00 综合调度优先级	0.726/0.046	0.873/0.035	0.957/0.114	0.572/0	0.816/0.2	0.596/0.12
20:45—21:00 经济调度	0.367/0.046	0.735/0.035	0.829/0.114	0.5/0	1/0	0.667/0

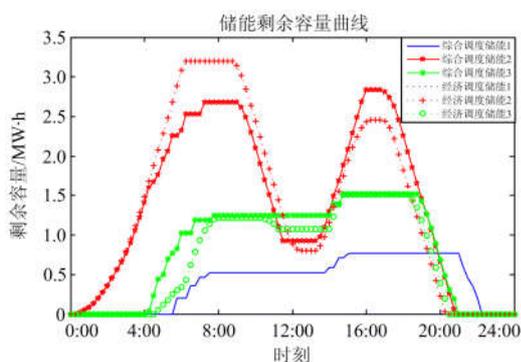


图 6 储能剩余容量曲线

Fig. 6 Remaining capacity curve of energy storage

由图 6 可以看出, 在经济调度方式下, 储能资源 1 在整个调度周期均未参与调度, 储能资源 2 和 3 剩余容量分别于 20:30 和 21:00 时刻左右下降至 0。储能资源因剩余容量不足而无法参与调度, 导致 20:15—21:30 时段无法完成调度指令。综合调度优先级的调度方式下, 资源调度综合考虑经济性、信用度以及供电能力, 储能等资源在剩余调度量较少的情况下综合调度指标下降, 转而调用可调度量较多的储能或者其他资源, 能够有效完成电网下达的调度指令。

4.2.2 不确定性问题的处理及求解

由于小容量资源不确定性问题的处理方法没有统一的差异判断准则, 故将其与求解算法结合在算例中进行比较分析。将本文模糊机会约束清晰化与蒙特卡洛模拟^[11]分别结合粒子群算法, 对典型场景进行仿真运算 20 次。仿真计算机处理器为 intel core i7-7700, 主频为 2.8 GHz, 内存为 8 GB。

将仿真结果取平均值, 得出两种算法的收敛曲线以及性能统计结果, 如图 7 和表 3 所示。

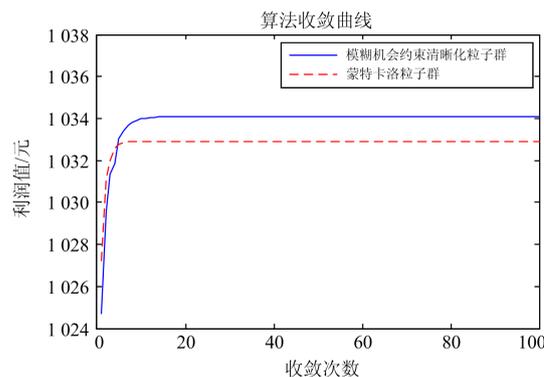


图 7 算法收敛曲线

Fig. 7 Algorithm convergence curve

表 3 两种算法性能统计表

Table 3 Performance statistics of two algorithms

算法性能	基于模糊机会约束清晰化的粒子群算法	蒙特卡洛粒子群算法
平均收敛值/元	1 034.2	1 032.9
平均收敛次数/次	15	11
平均单次循环时间/s	2.73	6.41
平均收敛时间/s	40.95	70.51

由图 7 可以看出, 模糊机会约束清晰化的粒子群算法收敛值为 1 034.2 元, 蒙特卡洛粒子群算法收敛值为 1 032.9 元, 两种算法计算出的资源聚合商利润值相近, 说明两种处理方法在表征小容量资源调度不确定性能力上基本一致。在寻优过程中, 基于模糊机会约束清晰化的粒子群算

法在 15 次左右收敛至最大值, 蒙特卡洛粒子群算法在循环 11 次左右收敛至最大值, 收敛次数相对较少。

由表 3 可以看出, 虽然蒙特卡洛粒子群算法平均收敛次数较少, 但单次循环时间较长, 收敛时间比基于模糊机会约束清晰化的粒子群算法更长。模糊机会约束转变为清晰等价类, 以约束的形式参与运算, 具有较快的运行速度, 而蒙特卡洛模拟需要大量模拟数据, 通过大数定律得出概率分布函数, 需要较长计算时间, 并且由于实际聚合区内 V2G 汽车等小容量资源具有流动性, 聚合区内资源量不断变化, 蒙特卡洛模拟的运算时间将会进一步增加, 不适合运用在实时调度过程。

结合算例可说明: 针对大容量资源的经济性、信用度以及供电能力进行评估, 确立其综合调度优先级并对各类资源进行有序调度, 能够兼顾调度模型的经济性和科学性, 有效完成电网公司下达的调度指令。利用模糊机会约束处理小容量资源的间接调度不确定性速度较快, 将其清晰化并结合粒子群算法, 可有效解决小容量资源调度过程中的不确定问题并实现资源聚合商联合调度模型的求解。

5 结语

本文研究了资源聚合商模式下分布式电源、储能与柔性负荷联合调度的模型。通过动态综合调度优先级确定大容量资源的调度次序, 利用模糊机会约束表征小容量资源的间接调度不确定性, 应用改进的粒子群算法求解模型, 实现了资源聚合商利润最大, 为资源聚合商提供了一种切实可行的经营模式。同时完成了调度指令, 有效支撑了电网安全高效运行。

更为精细化的联合调度模型和资源聚合商之间的竞价博弈, 是下一步深入研究的方向。包括: ① 为消除实际运行中存在的大容量分布式电源出力与预测值的偏差影响, 日内实时控制考虑引入模型预测控制技术; ② 可考虑从经济、风险的角度建立资源聚合商之间的竞价模型, 在保障经济利益和控制运行风险的同时参与调度权竞价博弈。

附录 A

表 A1 IEEE33 节点配电网系统参数数据
Table A1 IEEE33 node distribution network
system parameter data

首端节点	末端节点	$r/p.u.$	$x/p.u.$	$b/p.u.$
1	2	0.023 947	0.035 034	0.005 438
2	3	0.019 502	0.028 532	0.004 429
3	4	0.034 443	0.050 390	0.007 822
4	5	0.016 846	0.024 646	0.003 826
5	6	0.024 331	0.035 596	0.005 526
6	7	0.026 067	0.038 136	0.005 920
7	8	0.020 457	0.029 929	0.004 646
8	9	0.012 716	0.018 603	0.002 888
9	10	0.016 852	0.024 654	0.003 827
10	11	0.025 991	0.038 025	0.005 903
11	12	0.023 079	0.033 764	0.005 241
12	13	0.029 865	0.043 692	0.006 782
13	14	0.021 867	0.031 991	0.004 966
14	15	0.023 900	0.034 966	0.005 428
15	16	0.036 016	0.052 691	0.008 179
16	17	0.032 137	0.047 016	0.007 298
17	18	0.034 804	0.050 919	0.007 904
2	19	0.030 902	0.045 209	0.007 018
19	20	0.027 960	0.040 905	0.006 350
20	21	0.017 597	0.025 745	0.003 996
21	22	0.022 385	0.032 750	0.005 084
3	23	0.025 339	0.037 071	0.005 755
23	24	0.015 075	0.022 055	0.003 424
24	25	0.006 635	0.009 707	0.001 507
6	26	0.021 343	0.031 224	0.004 847
26	27	0.014 976	0.021 910	0.003 401
27	28	0.020 055	0.029 341	0.004 555
28	29	0.011 930	0.017 453	0.002 709
29	30	0.006 367	0.009 315	0.001 446
30	31	0.011 941	0.017 470	0.002 712
31	32	0.016 817	0.024 603	0.003 819
32	33	0.007 963	0.011 650	0.001 808

表 A2 小容量资源最大功率及节点参数数据

Table A2 Maximum power of small capacity resources and node parameter data

节点	小容量资源最大 功率/MW	节点类型	最大电压/ p.u.	最小电压/ p.u.
1	0	平衡节点	1.07	0.93
2	0.027	PV 节点	1.07	0.93
3	0.024	PV 节点	1.07	0.93
4	0.032	PV 节点	1.07	0.93
5	0.016	PV 节点	1.07	0.93
6	0.016	PV 节点	1.07	0.93
7	0.054	PV 节点	1.07	0.93
8	0.054	PV 节点	1.07	0.93
9	0.016	PV 节点	1.07	0.93
10	0.016	PV 节点	1.07	0.93
11	0.012	PV 节点	1.07	0.93
12	0.016	PV 节点	1.07	0.93
13	0.016	PV 节点	1.07	0.93
14	0.033	PV 节点	1.07	0.93
15	0.016	PV 节点	1.07	0.93
16	0.016	PV 节点	1.07	0.93
17	0.016	PV 节点	1.07	0.93
18	0.024	PV 节点	1.07	0.93
19	0.024	PV 节点	1.07	0.93
20	0.024	PV 节点	1.07	0.93
21	0.024	PV 节点	1.07	0.93
22	0.024	PV 节点	1.07	0.93
23	0.024	PV 节点	1.07	0.93
24	0.114	PV 节点	1.07	0.93
25	0.114	PV 节点	1.07	0.93
26	0.016	PV 节点	1.07	0.93
27	0.016	PV 节点	1.07	0.93
28	0.016	PV 节点	1.07	0.93
29	0.032	PV 节点	1.07	0.93
30	0.054	PV 节点	1.07	0.93
31	0.04	PV 节点	1.07	0.93
32	0.058	PV 节点	1.07	0.93
33	0.016	PV 节点	1.07	0.93

参考文献

- [1] 刘吉臻, 曾德良, 田亮, 等. 新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394.
LIU Jizhen, ZENG Deliang, TIAN Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394.
- [2] 杨天蒙, 宋卓然, 娄素华, 等. 用于提高风电渗透率的复合储能容量优化研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1488-1494.
YANG Tianmeng, SONG Zhuoran, LOU Suhua, et al. Research on optimization of composite energy storage capacity for improving wind power penetration rate[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1488-1494.
- [3] CALLAWAY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of electric loads[J]. Proceeding of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [4] 陈丽娜, 张智晟, 于道林. 基于广义需求侧资源聚合的电力系统短期负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 45-51.
CHEN Lina, ZHANG Zhisheng, YU Daolin. Short-term load forecasting model of power system based on generalized demand side resources aggregation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 45-51.
- [5] 程林, 万宇翔, 张放, 等. 基于负荷聚合商业业务的空调服务运作模式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 8-18.
CHENG Lin, WAN Yuxiang, ZHANG Fang, et al. Operation mode and control strategy of air conditioning service based on load aggregation business[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 8-18.
- [6] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [7] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [8] LI Jianing, WU Zhi, ZHOU Suyang, et al. Aggregator service for PV and battery energy storage systems of residential building[J]. CSEE Journal of Power and

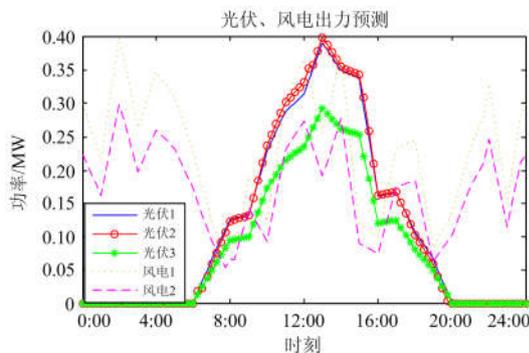


图 A1 光伏和风电出力预测图

Fig. A1 photovoltaic and wind power output prediction chart

- Energy Systems, 2015, 1(4): 3-11.
- [9] YANG Ye, YE Qing, LEONARD J, et al. Integrated size and energy management design of battery storage to enhance grid integration of large-scale PV power plants[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 394-402.
- [10] 梁宁, 邓长虹, 谭津, 等. 计及电量电价弹性的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 44-50.
LIANG Ning, DENG Changhong, TAN Jin, et al. Optimization scheduling with multiple time scale for active distribution network considering electricity price elasticity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 44-50.
- [11] 丁明, 林玉娟. 考虑风光荷不确定性的随机生产模拟[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2937-2944.
DING Ming, LIN Yujuan. Probabilistic production simulation considering the randomness of renewable wind power, photoelectricity and load[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2937-2944.
- [12] 钟海旺, 夏清, 张健, 等. 激励风电场提升功率预测精度的机制设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 47-53.
ZHONG Haiwang, XIA Qing, ZHANG Jian, et al. Mechanism design of incentivizing wind farm to improve power forecast accuracy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 47-53.
- [13] SHEN J, ALIREZA K. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 223-231.
- [14] HAO Xiao, WEI Pei, DONG Zuomin, et al. Bi-level planning for integrated energy systems incorporating demand response and energy storage under uncertain environments using novel metamodel[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 155-167.
- [15] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.
- [16] 李春燕, 王东, 张鹏, 等. 计及负荷聚合商调度优先权的独立微网双层实时调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 37-43.
LI Chunyan, WANG Dong, ZHANG Peng, et al. Double layer real-time scheduling model of independent microgrid considering scheduling priority of load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 37-43.
- [17] 黄伟, 熊伟鹏, 华亮亮, 等. 基于动态调度优先级的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3486-3498.
HUANG Wei, XIONG Weipeng, HUA Liangliang, et al. Multi-objective optimization dispatch of active distribution network based on dynamic schedule priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3486-3498.
- [18] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.
SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multi-objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.
- [19] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2708-2714.
SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, et al. A day-ahead scheduling model considering demand response and its uncertainty[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2708-2714.
- [20] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.
LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [21] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 57-63.
ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 57-63.

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-02-16

作者简介:

袁晓冬(1979—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电能质量与新能源;

费骏韬(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量及配电自动化;

葛乐(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源与主动配电网。E-mail: supertiger_bear@126.com

(编辑 葛艳娜)