

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.014

# 计及柔性负荷的高比例风光渗透下配电网孤岛划分策略

詹红霞<sup>1</sup>, 肖竣文<sup>1</sup>, 邓小勇<sup>2</sup>, 陈铁<sup>2</sup>, 张曦<sup>2</sup>, 何江涛<sup>2</sup>

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;

2. 国网重庆市电力公司市南供电分公司, 重庆 400060)

**摘要:**含分布式电源(DG)的配电网孤岛运行时存在电源出力不确定及负荷波动等问题,为确保孤岛能稳定可靠地供电,文中提出计及孤岛备用需求并充分发挥柔性负荷调控能力的动态孤岛划分策略。首先,建立考虑风电、光伏不确定性的预测误差模型,使用深度优先搜索算法得到各时段最大供电范围,采用机会约束规划来处理模型中的随机变量并根据最大供电范围得到各时段的孤岛备用需求。然后,通过改进的粒子群优化(PSO)算法充分发挥柔性负荷的调控能力,以故障恢复期间等效恢复价值最大为目标,得到在各置信水平下满足备用需求的最优孤岛划分结果。最后,以修改后的 IEEE 33 节点系统为例,验证了所提策略在确保孤岛可靠性的同时可有效增加孤岛价值。

**关键词:**柔性负荷;高比例风光;孤岛划分;备用需求;粒子群优化(PSO)算法;机会约束规划

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)04-0108-09

## 0 引言

分布式电源(distributed generator, DG)的爆发式增长给配电网稳定性带来了挑战,同时也给配电网供电恢复带来了新的解决方案。当含DG的配电网发生停电故障时,可通过DG形成孤岛首先恢复供电,基于DG的孤岛划分则是其中重要的一步。

目前国内外对含DG的配电网孤岛划分问题进行了大量研究。文献[1]提出功率圆的概念并以负荷失电损失最小为目标进行孤岛划分;文献[2]考虑了负荷重要度和联络开关等因素,通过构建平均层数和平均度值2个目标函数,以支路和节点优先级作为启发式规则,提出了孤岛划分方法;文献[3—4]分别采用Dijkstra算法和背包树问题(tree knapsack problem, TKP)来求解划分策略;文献[5]引入了“虚拟节点”和“虚拟需求”2个概念,提出了一种基于有向图的支路方向可变的配电网结构模型。文献[1—5]得到的均是静态的孤岛,仅考虑了单个时间断面,忽略了DG出力的波动性,文献[6—8]则综合考虑了DG出力和负荷的波动性,基于功率平衡进行多时段的孤岛划分。文献[9]充分发挥了可控负荷的调控能力并计及了恢复负荷总量、设备开关次数等指标,但其假设负荷在供电恢复阶段始终处于额定功率,忽略了运行情况的复杂性。文献[6—9]针对DG和负荷的波动性仅采用了预测的电源出力和负荷功率曲线,但也有部分研究考虑到

了源荷的不确定性问题,文献[10]通过构建系统综合运行风险指标来应对源荷波动性问题;文献[11]采用模糊C-均值聚类算法对时变负荷进行聚类,以解决供电恢复过程中负荷波动的问题;文献[12]提出了一种基于随机响应面的故障恢复方法来处理源荷的不确定性。现有研究大多从电源和负荷的预测功率曲线出发,考虑DG出力不确定性的研究尚少,也并未充分利用各种类柔性负荷的主动调控能力来增加孤岛的可靠性和讨论各置信水平下恢复孤岛的价值。

基于此,文中提出了在新能源高比例渗透情况下的考虑风光预测误差的孤岛划分策略。首先建立风电和光伏出力的概率模型,利用机会约束规划处理备用约束中的随机变量。对孤岛部分采用两阶段划分方法,第一阶段,采用深度优先搜索算法来确定电源最大供电范围;第二阶段,充分发挥柔性负荷的调控能力,在考虑备用需求的前提下利用柔性负荷参与孤岛调整并使得恢复孤岛的等效恢复价值最大。最后,以修改后的IEEE 33节点系统为例进行验证,结果表明所提策略可以在确保孤岛可靠性的同时有效增加孤岛价值,并能为配电网运行置信水平的选择提供参考。

## 1 考虑风光预测误差的源荷模型

### 1.1 DG模型

风电和光伏的出力<sup>[13—14]</sup>可分别根据各时段内的风速和光照强度预测值得到。由于预测本身具有一定误差,可能造成出力过高导致弃风弃光,或

收稿日期:2022-01-27;修回日期:2022-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877181)

出力不足导致甩负荷,因此有必要将可能的误差考虑在内。在故障恢复中,主要考虑出力不足导致的甩负荷问题。

由于风速波动,风机在不同时刻的出力并不稳定,风电出力具有不确定性,现有预测方法仍未达到可忽略预测误差的精度,因此需要对其出力的概率密度进行拟合。目前对风电出力的拟合方法有正态分布法<sup>[15]</sup>、拉普拉斯分布法<sup>[16]</sup>以及 Beta 分布法<sup>[17-18]</sup>。文中采用文献[17]中的 Beta 分布概率密度函数来拟合风电出力,Beta 分布有如下优点:(1)自变量取值范围为 $[0,1]$ ,与标么化后的风电和光伏出力值的取值范围一致;(2)函数图像可随参数变化而灵活变化,对不同情况下的风电出力描述更佳。

光伏发电系统的主要组成部分包括光伏组件、逆变器和控制器,当光伏面板的面积和组件型号确定时,光伏发电系统的出力仅随光照强度变化而变化。光照强度在 1 d 中近似服从 Beta 分布,其概率密度函数参见文献[19]。

## 1.2 储能模型

风电和光伏属于不可控 DG,出力具有波动性和不确定性,因此每个孤岛都至少要有有一个具备黑启动能力的电源作为主电源。储能具有稳定输出功率的特性,在 VF 模式下可维持孤岛电压、频率稳定,但因其荷电状态(state of charge, SOC)特性及本身容量限制,通常会和其他新能源相结合作为供电电源。储能的 SOC 和容量约束为:

$$S_{\text{soc}}^{\min} \leq S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc}}^{\max} \quad (1)$$

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{soc}}(t)$ 为 $t$ 时刻储能的 SOC; $S_{\text{soc}}^{\max}$ ,  $S_{\text{soc}}^{\min}$ 分别为储能 SOC 的上、下限; $E(t)$ 为 $t$ 时刻储能电量; $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$ 分别为储能电量的上、下限。

相较于传统黑启动电源,储能既可充电又可放电的特点使其功率调控范围更大,响应速度也更快,可满足保证孤岛供电质量的要求。当孤岛上风电/光伏的出力小于负荷需求时,储能进行放电;大于负荷需求时,储能进行充电。

储能的充、放电约束为:

$$0 \leq P_{\text{ess, in}}(t) \leq \eta_1 P_{\text{ess, in}}^{\max} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{\text{ess, out}}(t) \leq \eta_2 P_{\text{ess, out}}^{\max} \quad (4)$$

$$\eta_1 + \eta_2 = 1 \quad (5)$$

式中: $P_{\text{ess, in}}(t)$ ,  $P_{\text{ess, out}}(t)$ 分别为储能单次的充、放电功率; $P_{\text{ess, in}}^{\max}$ ,  $P_{\text{ess, out}}^{\max}$ 分别为储能单次充、放电功率的最大值; $\eta_1$ ,  $\eta_2$ 分别为充、放电 0-1 状态变量。

## 1.3 负荷模型

电网负荷可分为刚性负荷和柔性负荷两大类,

刚性负荷能接受电网调控的程度很低,柔性负荷则可在电网供需不平衡时参与电网调控。柔性负荷包括自弹性负荷(可中断负荷)、可调节负荷(负荷聚合商)、可平移负荷等<sup>[20-23]</sup>。不同种类的柔性负荷可接受调控的方式、程度、时间存在较大差异。由于负荷本身具有波动性,因此需要考虑负荷带来的备用需求,现有研究大多是将负荷的备用需求设定为该时刻负荷值的 5%<sup>[24]</sup>。

供电部门可根据事先的合同约定对柔性负荷的供电进行调整。对于可中断负荷,可根据合同约定在规定时间内进行中断供电,但其中断的容量和持续时间均有一定限制,假设可中断负荷 1 d 内可被多次调度,其须满足可中断容量约束和可中断持续时间约束,如式(6)、式(7)所示。

$$0 \leq P_{\text{cl},i}(t) \leq P_{\text{cl},i}^{\max}(t) \rho_{\text{cl},i}(t) U_{\text{cl},i} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T \rho_{\text{cl},i}(t) \leq D_i^{\max} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{cl},i}(t)$ ,  $P_{\text{cl},i}^{\max}(t)$ 分别为 $t$ 时刻可中断负荷节点 $i$ 的实际中断量与其功率最大值; $\rho_{\text{cl},i}(t)$ 为 0-1 状态变量,取 1 表示 $t$ 时刻可中断负荷节点 $i$ 被中断; $U_{\text{cl},i}$ 为可中断负荷节点 $i$ 的中断系数; $D_i^{\max}$ 为调度周期中可中断负荷节点 $i$ 的最大可中断持续时间; $T$ 为总故障时长。

对于可平移负荷,其可平移容量须满足约束:

$$0 \leq P_{\text{tr},i}(t) \leq P_{\text{tr},i}^{\max}(t) \rho_{\text{tr},i}(t) U_{\text{tr},i} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{tr},i}(t)$ ,  $P_{\text{tr},i}^{\max}(t)$ 分别为 $t$ 时刻可平移负荷节点 $i$ 实际平移量与其功率最大值; $\rho_{\text{tr},i}(t)$ 为 0-1 状态变量,取 1 表示 $t$ 时刻可平移负荷节点 $i$ 被平移; $U_{\text{tr},i}$ 为可平移负荷节点 $i$ 的平移系数。

由于可调节负荷,如居民用户的空调、热水器等单个可调控容量小、分布分散,因此通常以负荷代理商的方式参与调控<sup>[25]</sup>,在供电恢复中,通常只考虑负荷的削减能力。

## 1.4 孤岛备用需求

### 1.4.1 上、下备用约束

上备用约束:

$$P \{ S_{\text{ess}}^{\text{up}}(t) + S_{\text{fl}}(t) \geq S_{\text{ld}}^{\text{up}}(t) + \max(p_g(t) - P_g(t), 0) \} \geq \alpha \quad (9)$$

$$S_{\text{ess}}^{\text{up}}(t) = \min(P_{\text{ess, out}}^{\max} - P_{\text{ess}}(t), \eta_2 P_{\text{ess, out}}^{\max}) \quad (10)$$

下备用约束:

$$P \{ S_{\text{ess}}^{\text{dn}}(t) + S_{\text{fl}}(t) \geq S_{\text{ld}}^{\text{dn}}(t) + \max(P_g(t) - p_g(t), 0) \} \geq \alpha \quad (11)$$

$$S_{\text{ess}}^{\text{dn}}(t) = \min(P_{\text{ess}}(t), \eta_1 P_{\text{ess, in}}^{\max}) \quad (12)$$

式中: $P\{\cdot\}$ 为事件可信程度; $S_{\text{ess},t}^{\text{up}}$ ,  $S_{\text{ess},t}^{\text{dn}}$ 分别为 $t$ 时刻储能提供的上、下备用容量; $S_{\text{fl}}(t)$ 为 $t$ 时刻柔性

负荷可调节量;  $S_{id}^{up}(t)$ ,  $S_{id}^{dn}(t)$  分别为  $t$  时刻孤岛负荷的上、下备用需求;  $P_g(t)$ ,  $p_g(t)$  分别为  $t$  时刻风电/光伏的实际功率与预测功率;  $\alpha$  为上、下备用约束置信水平;  $P_{ess}(t)$  为  $t$  时刻储能的实际功率。

### 1.4.2 机会约束规划处理随机变量

当模型中含有随机变量时,在极端情况下可能出现决策不满足约束条件的情况,可以通过机会约束规划将此类不确定性约束转化为确定性约束,只需要使约束条件成立的概率不小于某一置信水平即可。机会约束规划求解含随机变量的模型如下:

$$\begin{cases} \max \bar{f} \\ \text{s.t. } P\{f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \geq \bar{f}\} \geq \eta \\ P\{g_s(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0\} \geq \beta \quad s = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\bar{f}$  为置信水平不低于  $\eta$  时目标函数的最大值;  $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$  为目标函数;  $g_s(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$  为约束函数;  $p$  为约束条件个数;  $\mathbf{x}$  为决策向量;  $\boldsymbol{\xi}$  为随机参数向量;  $\eta$ ,  $\beta$  为事先给定的置信水平。

利用机会约束规划的方法,可将式(10)、式(12)中由于风电和光伏不确定性引起的上、下备用需求约束转换为确定性约束。

$$S_g^{up}(t) = P_g^e \int_a^{P_{gb}(t)} (P_{gb}(t) - p) f(p) dp \quad (14)$$

$$S_g^{dn}(t) = P_g^e \int_{P_{gb}(t)}^b (p - P_{gb}(t)) f(p) dp \quad (15)$$

式中:  $S_g^{up}(t)$ ,  $S_g^{dn}(t)$  分别为  $t$  时刻风电/光伏概率上的上、下备用需求容量;  $P_g^e$  为风电/光伏的额定容量;  $P_{gb}(t)$  为  $t$  时刻标幺化的风电/光伏预测出力;  $p$  为风电/光伏出力的随机变量;  $f(p)$  为风电/光伏的出力概率密度函数;  $a$ ,  $b$  分别为对应置信水平下区间的下限和上限。

$a$ ,  $b$  与置信水平  $\alpha$  有如下关系:

$$\int_0^a f(p) dp = (1 - \alpha) \int_0^{P_{gb}(t)} f(p) dp \quad (16)$$

$$\int_0^b f(p) dp = \alpha + (1 - \alpha) \int_0^{P_{gb}(t)} f(p) dp \quad (17)$$

## 2 孤岛划分策略

在孤岛划分策略中,首先根据电源的可用出力确定初级孤岛范围,然后在此基础上计及不同置信水平下的孤岛备用需求,充分发挥柔性负荷的主动调控能力进行孤岛优化,策略的整体流程见图1。

### 2.1 初级孤岛划分策略

#### 2.1.1 最大供电范围

在实际中,配电网中的电源通常不能满足所有负荷的供电需求,发生故障后,由于其功率大小限

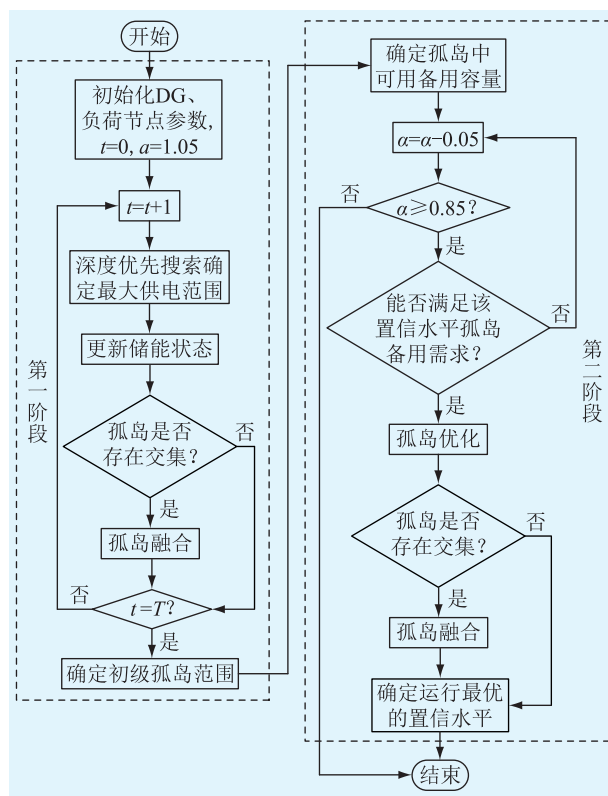


图1 孤岛划分策略流程

Fig.1 Flow chart of island division strategy

制,也仅能为周边一定范围的负荷提供电能,所以讨论在最大供电范围外的供电恢复并无太大意义<sup>[26]</sup>。由此,第一阶段可首先确定最大可供电的孤岛范围,形成初级孤岛。在确保一级负荷优先恢复的前提下,尽可能地多恢复供电,初级孤岛的目标函数为恢复负荷的权重最大:

$$\max W_1 = \sum_{i=1}^T V_i P_i(t) \quad (18)$$

式中:  $W_1$  为恢复负荷的权重;  $V_i$  为负荷节点  $i$  的权重值;  $P_i(t)$  为  $t$  时刻负荷节点  $i$  的功率值。

为了使得到的孤岛保持稳定,孤岛须满足功率平衡约束、节点电压约束、支路功率容量约束和网络拓扑结构约束:

$$\sum P_{ld}(t) + \sum P_{ls}(t) \leq \sum P_g(t) + \sum P_{ess}(t) \quad (19)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i(t) \leq U_i^{\max} \quad (20)$$

$$S_l \leq S_l^{\max} \quad (21)$$

$$g \in G \quad (22)$$

式中:  $P_{ld}(t)$  为  $t$  时刻孤岛负荷的有功功率;  $P_{ls}(t)$  为  $t$  时刻线路损耗;  $U_i(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的电压值;  $U_i^{\max}$ ,  $U_i^{\min}$  分别为节点  $i$  电压上、下限;  $S_l$ ,  $S_l^{\max}$  分别为支路  $l$  的实际功率和最大允许值;  $g$  为孤岛网络拓扑结构;  $G$  为所有辐射状网络结构集合。

### 2.1.2 深度优先搜索策略

采用深度优先搜索算法可得到最大供电范围,其思路为:首先获取电源出力及负荷数据,以主电源为根节点,选取未访问过的根节点的临接节点,判断路径上节点功率和是否超出电源功率,若未超过则继续搜索下一节点,重复上一步骤,直到路径上所有节点的功率和超出电源功率,至此得到电源的最大供电范围。

## 2.2 计及备用需求的孤岛优化策略

### 2.2.1 孤岛优化策略

在第二阶段中,充分发挥柔性负荷的调控能力,通过对柔性负荷的调控使得划分的孤岛满足备用需求。在满足事前签订的合同约定条件下调控各类柔性负荷,使其与初始供电范围相比,孤岛中恢复的负荷等效价值更大,优化的成本损耗更低,得到的孤岛范围更优。

$$\max W_2 = \Delta W - \sum_{z=1}^3 w_z \quad (23)$$

$$w_1 = \mu_1 \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M u_m(t) \quad (24)$$

$$w_2 = \mu_2 \int_0^T |P_{\text{ess}}(t)| l_{\text{soc}}(t) dt \quad (25)$$

$$w_3 = \mu_3 \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J r_j (P_j^2 + Q_j^2) / U_j^2 \quad (26)$$

式中:  $W_2$  为孤岛优化后负荷等效价值;  $\Delta W$  为新增孤岛的负荷等效价值;  $w_1, w_2, w_3$  分别为开关动作次数指标、储能寿命损耗指标、线路损耗指标的权重值;  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  为对应指标的权重系数;  $M$  为开关个数;  $u_m(t)$  为开关  $m$  动作的 0-1 变量,动作时取 1;  $l_{\text{soc}}(t)$  为储能寿命损耗系数<sup>[27]</sup>;  $r_j$  为支路  $j$  的阻抗;  $P_j, Q_j, U_j$  分别为支路  $j$  的有功功率、无功功率、节点电压。

### 2.2.2 改进 PSO 算法求解优化孤岛

文中采用改进的粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法求解孤岛优化策略。PSO 算法实现简单,具有较快的收敛速度,但传统 PSO 算法容易陷入局部最优,采用改进的变权重 PSO 算法可以保持全局和局部较好的平衡,其权重更新公式为:

$$w(k) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) [2k/K_{\max} - (k/K_{\max})^2] \quad (27)$$

式中:  $w(k)$  为第  $k$  次迭代中更新的权重;  $w_{\max}, w_{\min}$  分别为迭代过程中惯性权重的最大值和最小值;  $K_{\max}$  为最大迭代次数。

## 2.3 孤岛融合处理

当有 2 个或以上的孤岛存在交集时,应进行孤岛融合。将孤岛中的 DG 融合成一个节点,出力为

之前 DG 的出力及储能剩余电量之和,并重新确定孤岛范围,保留更新后的孤岛范围,重复以上步骤,直到所有孤岛之间均为独立状态。当孤岛各自没有交集时,孤岛划分结束。孤岛融合有利于提高孤岛稳定性并在故障修复完成后更快恢复供电。

## 3 算例分析

### 3.1 基础数据

使用修改后的 IEEE 33 节点配电网模型<sup>[28]</sup> 仿真,在节点 6 和 15 均接入最大容量为 700 kW 的光伏,在节点 20,30 均接入最大容量为 500 kW 的风电,每个 DG 接入位置同时配有储能装置,储能容量为 400 kW·h, SOC 范围为 20%~95%。文中系统中, DG 渗透率约 80%。假设故障时,在 0—1 节点间发生三相接地短路故障,储能初始 SOC 为最大值。配电网中节点 6,15,26,31 为一级负荷节点;节点 4,8,9,11,13,18,21,32 为二级负荷节点;其他节点为三级负荷节点。为体现供电恢复的优先级,对一、二、三级负荷分别赋以权值 100,10,1,损耗权重取 1,柔性负荷数据如表 1 所示。改进的 PSO 算法参数设置:粒子种群规模取 100;最大迭代次数为 150;学习因子  $c_1, c_2$  均取 2;变惯性权重  $w_{\max} = 0.9, w_{\min} = 0.3$ ;粒子速度  $v_{\max} = 10, v_{\min} = -10$ 。

表 1 柔性负荷数据  
Table 1 Flexible load data

节点	可中断量/%	可平移量/%	可调节量/%	可控时段
14,16,27	100			06:00—18:00
19	80			08:00—12:00
3,7	80			12:00—20:00
20,22,28	50			06:00—18:00
5,10		25		09:00—17:00
23,25		15		08:00—16:00
12,29,17,30			15	06:00—18:00

供电恢复时,对于负荷的备用需求应根据各孤岛的实际负荷值来确定。按照文中方法确定最大供电范围后,每个孤岛的负荷备用需求取各孤岛负荷总额的 5%。风、光预测有功出力曲线如图 2 所示。假设在 09:00 时发生停电故障,预计停电时间为 4 h,在此期间 DG 出力波动较大,光伏出力呈增大趋势,风电出力总体呈减少趋势。

为分析柔性负荷参与调控对孤岛备用需求及孤岛恢复价值的影响,考虑以下情形:情形一,仅考虑柔性负荷中的可中断负荷参与调控;情形二,加入考虑可平移负荷和可调节负荷参与调控。

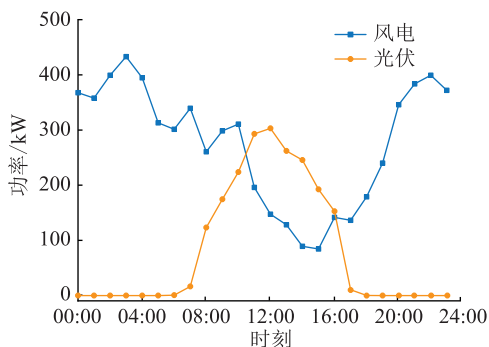


图2 风光预测有功出力

Fig.2 Wind and solar power prediction

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 情形一结果分析

风电、光伏并网时,不同置信水平需要应对 DG 不确定性的备用需求不同。图 3 为风电和光伏在不同置信水平下的上备用需求。由于光伏有效出力时间在每日的 06:00—18:00,因此对光伏发电仅考虑其正常工作时的上备用需求。由图 3 可知,上备用需求随置信水平增大而增大。置信水平增大表示孤岛稳定性提高,但也意味着可供恢复的功率降低。利用深度优先搜索算法得到初级孤岛,初级孤岛中得到恢复的功率为 5 048.98 kW,恢复的负荷权重为 146 135.51,初级孤岛划分结果如图 4 所示。

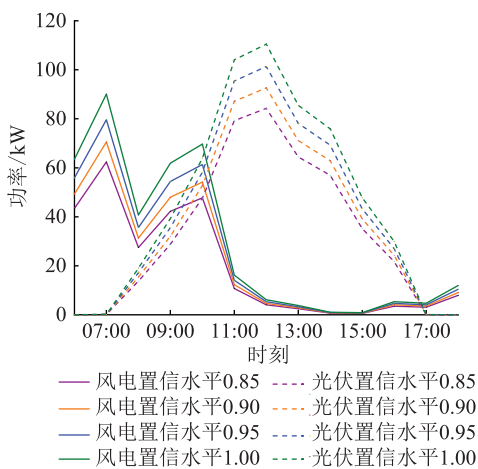


图3 各置信水平下的上备用需求

Fig.3 Standby demand at each confidence level

情形一中与初级孤岛相比的各置信水平下的恢复功率减少值、可中断负荷中断量如图 5 所示。从图 5 置信水平降低的过程来看,当置信水平为 0.90 时,孤岛中的可中断负荷中断量、恢复功率减少值、新增等效价值均开始出现较大变化,这是因为在此置信水平下 12:00—13:00 时段新增了节点 3,如图 6 所示。与初级孤岛相比,恢复负荷的等效价值在置信水平为 1.00 时也有所增加,说明柔性负荷参与调控虽然降低了孤岛中的总恢复功率,但能保

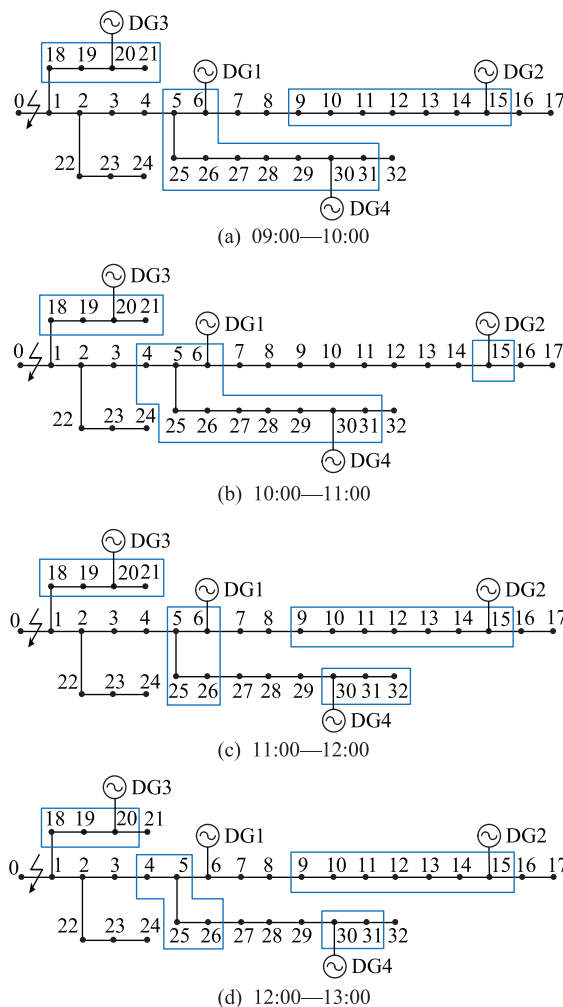


图4 初级孤岛划分结果

Fig.4 Primary island division results

证恢复负荷的重要程度得到提高。

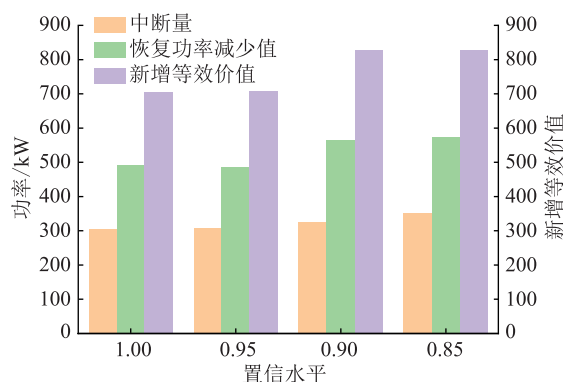


图5 情形一中各置信水平结果对比

Fig.5 Comparison of results at each confidence level in case one

表 2 为 12:00—13:00 的孤岛备用需求情况,表中定义的孤岛编号以 DG 编号为准,如孤岛 1 表示 DG1 形成的孤岛。在 12:00—13:00,孤岛 1 在考虑可中断负荷后仍不能满足置信水平为 1.00 时的备用需求,若此时以置信水平为 1.00 的备用需求运

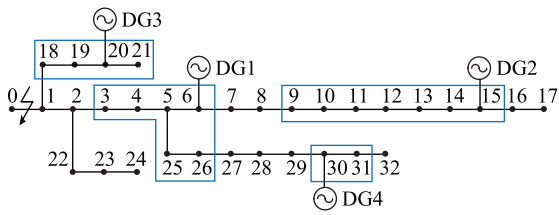


图6 置信水平 0.90 时 12:00—13:00 孤岛划分结果  
Fig.6 Island division results from 12:00 to 13:00 under 0.90 confidence level

行,为应对出力和负荷的不确定性因素,保证孤岛稳定性,将不得不切负荷。因此,在风电和光伏作为供电恢复的电源时,供电部门需要综合考虑可靠性和收益来确定适合的置信水平。情形一中各置信水平下的损耗情况如表 3 所示。

表 2 12:00—13:00 孤岛备用需求情况

Table 2 Island standby requirements from 12:00 to 13:00 kW

编号	可提供的备用需求	置信水平			
		1.00	0.95	0.90	0.85
孤岛 1	139.90	147.56	138.87	130.59	122.67
孤岛 2	130.30	126.24	117.55	109.27	101.35
孤岛 3	175.39	38.98	38.16	37.47	36.88
孤岛 4	122.74	32.69	31.87	31.19	30.59

表 3 情形一中损耗情况对比

Table 3 Comparison of loss results in case one

指标	初级孤岛	置信水平			
		1.00	0.95	0.90	0.85
开关次数	18	16	16	16	16
储能损耗/(kW·h)	1 105.21	1 189.93	1 149.57	1 113.27	1 105.20
线路损耗/(kW·h)	21.72	12.56	12.33	12.02	11.94

为验证 DG 渗透率对孤岛备用需求的影响,将电源中光伏的最大容量设定为 700 kW,风电的最大容量设定为 800 kW,此时系统中 DG 渗透率变为 90%。表 4 为 2 种渗透率下的孤岛备用需求情况,其中孤岛 1 的数据为渗透率 90%下 12:00—13:00 时段的备用需求。此时段孤岛 1 可提供的备用需求为 101.63 kW,可以看出,此时孤岛 1 在所有可中断负荷为最大中断量时也无法满足讨论的 4 个置信水平下的备用需求,对应时段的初级孤岛划分结果见图 7,重要负荷节点 26 处于孤岛 1 的边缘,若选择减负荷运行将会失去对重要负荷的供电。从渗透率变化的角度来看,间歇性 DG 并网容量的增长导致孤岛总备用需求也随之增长,此时应同步增大系统中其他备用机组的容量。

表 4 2 种渗透率下的孤岛备用需求情况

Table 4 Standby demand of islands under two permeability conditions kW

置信水平	孤岛 1	总孤岛	
		80%渗透率	90%渗透率
1.00	132.90	1 238.89	1 406.01
0.95	123.33	1 160.59	1 304.99
0.90	116.53	1 090.59	1 217.04
0.85	108.17	1 025.89	1 134.80

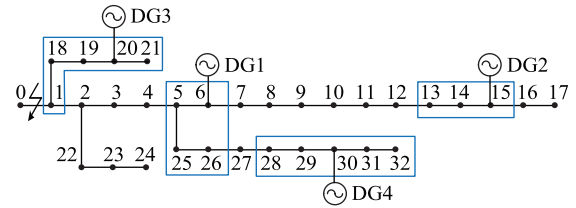


图 7 渗透率 90%时 12:00—13:00 初级孤岛划分结果

Fig.7 Primary island division results from 12:00 to 13:00 under 90% permeability

### 3.2.2 情形二结果分析

为充分发挥配电网中各类柔性负荷的调控能力,研究不同柔性负荷类型对优化策略的适应性,加入考虑可平移负荷和可调节负荷参与调度。可平移负荷可根据合同约定在规定时间内进行负荷平移,在故障恢复中,通常将其平移到符合规定的正常运行时段内,这样既能增加对其他负荷的恢复,又能提高孤岛稳定性,且与可中断负荷相比,调度时对用户满意度影响更小。居民负荷中约 60%都可用作柔性负荷,其用电时间可灵活变动,但难以直接控制,一般以负荷代理商的方式参与电网调度。

可平移负荷与可调节负荷参与调度后可满足所有置信水平下的孤岛备用需求容量。图 8 为情形二各置信水平下恢复功率与新增等效价值对比。随着置信水平的降低,孤岛恢复功率并未持续增大,但孤岛等效恢复价值持续增加,这是因为文中采用优先恢复重要负荷策略,使得已恢复孤岛的等效恢复价值最大。在置信水平 0.85 时的 12:00—13:00 时段,新增了二级负荷节点 8,32,如图 9 所示,因此新增等效价值有较大增加。从图 8 可以看出,置信水平降低并不意味着孤岛恢复价值有效增加,当孤岛边缘不存在较高等级的负荷节点时,可采用高置信水平运行的方式来确保孤岛稳定可靠供电。如情形二中可选择置信水平为 0.85 时的恢复方式,此时供电恢复的价值收益较大。

### 3.2.3 结果对比

情形二相比情形一恢复功率与等效恢复价值的增长率如表 5 所示。可平移与可调节负荷参与调

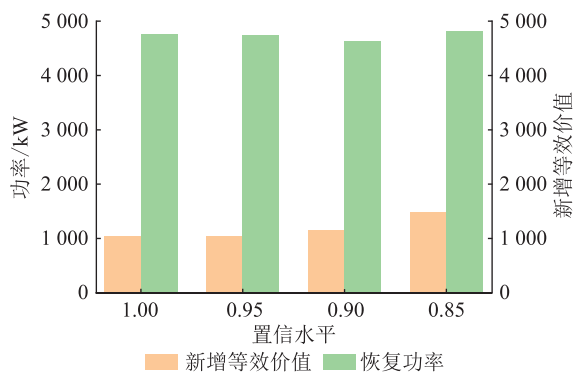


图8 情形二中各置信水平结果对比  
Fig.8 Comparison of results at each confidence level in case two

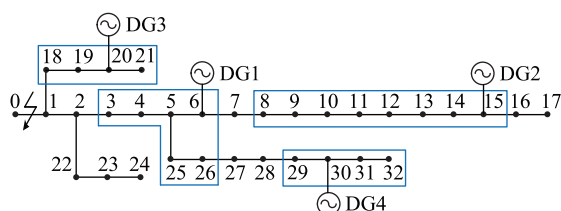


图9 情形二置信水平 0.85 时 12:00—13:00 孤岛结果  
Fig.9 Island results in case two from 12:00 to 13:00 under 0.85 confidence level

控后,恢复功率与等效恢复价值均得到增长,体现了柔性负荷的调节优势。从增长率的角度可帮助供电部门判断在某一置信水平下是否有必要加入更多柔性负荷参与调控,如在置信水平为 0.90 时采用情形二方式相比之下增加的收益并不大。

表5 情形二相比情形一的优化结果增长率  
Table 5 The growth rate of optimization results in case two compared to case one %

置信水平	恢复功率增长率	等效恢复价值增长率
1.00	4.2	47.9
0.95	4.0	47.6
0.90	3.4	26.1
0.85	7.6	78.7

#### 4 结语

文中对新能源高比例渗透情况下的配电网动态孤岛划分进行了研究,首先采用深度优先搜索算法得到最大供电范围,利用风电和光伏的概率密度函数求解间歇电源出力不确定导致的孤岛备用需求,使用机会约束规划处理随机变量的不确定性;然后基于改进 PSO 算法分析求解不同置信水平、不同种类柔性负荷参与调控对孤岛划分的影响。算例分析表明,孤岛备用需求会随着间歇电源的出力 and 置信水平的变化而变化。通过调控柔性负荷可

平衡不同置信水平下的孤岛稳定性与经济性需求,并有效增加恢复孤岛的等效价值,相比未考虑孤岛备用需求的故障后供电恢复,提高了供电的可靠性,更具现实意义。文中对负荷的备用需求假定为较小范围的波动,而故障停电后,配电网中用户的用电情况会与电网正常运行时存在较大不同,此时负荷波动也更为复杂,对于恢复阶段中的负荷备用需求情况还有待进一步研究。

本文得到四川省教育厅项目(18ZB0566)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 张帆,杨翮,商佳宜,等. 考虑负荷损失最小的配网孤岛划分策略研究[J]. 高压电器,2021,57(4):181-188.  
ZHANG Fan, YANG Xuan, SHANG Jiayi, et al. Study on island partition strategy of distribution network considering minimum load loss[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 181-188.
- [2] 刘文轩,姚玉海,齐伟强,等. 基于启发式规则的配电网孤岛划分算法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):166-172.  
LIU Wenxuan, YAO Yuhai, QI Weiqiang, et al. An algorithm on island partition of the distribution system based on Heuristic rule [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 166-172.
- [3] 姚玉海,张璇,齐伟强,等. 基于 Dijkstra 算法的配电网孤岛划分[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):36-43.  
YAO Yuhai, ZHANG Xuan, QI Weiqiang, et al. Island partition of the distribution system based on Dijkstra algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 36-43.
- [4] ZHU J P, GU W, JIANG P, et al. Integrated approach for optimal island partition and power dispatch[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 449-462.
- [5] 胡哲晟,郭瑞鹏,蓝海波,等. 基于有向图的含分布式电源配电网孤岛划分模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):97-104.  
HU Zhesheng, GU RuiPeng, LAN Haibo, et al. Islanding model of distribution systems with distributed generators based on directed graph[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 97-104.
- [6] 李振坤,周伟杰,王坚敏,等. 基于风光功率曲线的有源配电网动态孤岛划分方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):58-64,71.  
LI Zhenkun, ZHOU Weijie, WANG Jianmin, et al. Dynamic islanding method of active power distribution network based on wind-photovoltaic-load curve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 58-64, 71.
- [7] 孙悦,王海燕,同向前. 基于功率与电量预估的有源配电网动态孤岛划分策略[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(5):155-161.  
SUN Yue, WANG Haiyan, TONG Xiangqian. Dynamic islanding strategy on active power distribution network based on power and electricity estimation[J]. Power Capacitor & Reactive Po-

- wer Compensation, 2018, 39(5):155-161.
- [8] 杨帅,夏明超,陈奇芳. 计及源-网-荷互动的主动配电网实时动态孤岛划分策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(6):1-8.  
YANG Shuai, XIA Mingchao, CHEN Qifang. Real-time dynamic island partitioning strategy of active distribution network considering interaction of source-network-load [J]. Smart Power, 2019, 47(6):1-8.
- [9] 刘礼邦,武传涛,随权,等. 计及可控负荷参与的主动配电网动态恢复供电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9):27-35.  
LIU Libang, WU Chuantao, SUI Quan, et al. Power supply strategy for active distribution network dynamic recovery with controllable load participation [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9):27-35.
- [10] 李振坤,路群,符杨,等. 有源配电网动态重构的状态分裂多目标动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17):5025-5036, 5284.  
LI Zhenkun, LU Qun, FU Yang, et al. State split multi-objective dynamic programming algorithm for dynamic reconfiguration of active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17):5025-5036, 5284.
- [11] 田晶晶,李安乐,高锋阳,等. 含光伏发电和时变负荷的主动配电网孤岛划分[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9):125-131.  
TIAN Jingjing, LI Anle, GAO Fengyang, et al. Islanding division of active distribution network with photovoltaic generation and time-varying load [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9):125-131.
- [12] WANG F, XIAO X Y, SUN Q Q, et al. Service restoration for distribution network with DGs based on stochastic response surface method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 107:557-568.
- [13] 黄瀚燕,周明,李庚银. 考虑多重不确定性和备用互济的含风电互联电力系统分散协调调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2):381-389.  
HUANG Hanyan, ZHOU Ming, LI Gengyin. Coordinated decentralized dispatch of wind-power-integrated multi-area interconnected power systems considering multiple uncertainties and mutual reserve support [J]. Power System Technology, 2019, 43(2):381-389.
- [14] 张锶恒. 考虑分布式光伏与储能接入的配电变压器选型定容规划[D]. 广州:华南理工大学, 2020.  
ZHANG Siheng. Type and capacity planning of distribution transformer considering the impact of distributed photovoltaic and energy storage access [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [15] 李枫. 风力发电机组功率曲线拟合方法研究及其应用[D]. 重庆:重庆大学, 2019.  
LI Feng. Research and application of power curve fitting method for wind turbine [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [16] HODGE B M S, ELA E G, MILLIGAN M. Characterizing and modeling wind power forecast errors from operational systems for use in wind integration planning studies [J]. Wind Engineering, 2012, 36(5):509-524.
- [17] 杨宏,闫玉杰,王瑜. Beta分布在风电预测误差模型中的适用性[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11):37-41, 48.  
YANG Hong, YAN Yujie, WANG Yu. Applicability of Beta distribution on wind power forecast error modeling [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11):37-41, 48.
- [18] 杨茂,代博祉,刘蕾. 风电功率概率预测研究综述[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(2):1-6.  
YANG Mao, DAI Bozhi, LIU Lei. A review of wind power probabilistic prediction [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(2):1-6.
- [19] 王洪坤,葛磊蛟,李宏伟,等. 分布式光伏发电的特性分析与预测方法综述[J]. 电力建设, 2017, 38(7):1-9.  
WANG Hongkun, GE Leijiao, LI Hongwei, et al. A review on characteristic analysis and prediction method of distributed PV [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(7):1-9.
- [20] 姜婷玉,李亚平,鞠平,等. 柔性负荷控制及模型研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(10):1-8.  
JIANG Tingyu, LI Yaping, JU Ping, et al. Overview of modeling method for flexible load and its control [J]. Smart Power, 2020, 48(10):1-8.
- [21] 陈长青,阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4):169-177.  
CHEN Changqing, YANG Tongguang. Research on grid energy storage and photovoltaic coordination planning with flexible load [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4):169-177.
- [22] 杨雪. 计及柔性负荷的多时间尺度主动配电网优化调度研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.  
YANG Xue. Optimal scheduling of active distribution networks based on flexible loads on multiple time scales [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [23] 景皓,贾伯岩,卢志刚,等. 考虑可平移负荷管理的主动配电网故障恢复方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(11):48-54, 61.  
JING Hao, JIA Boyan, LU Zhigang, et al. Fault recovery method for active distribution network considering shiftable load management [J]. Smart Power, 2020, 48(11):48-54, 61.
- [24] 陈厚合,王杨,张儒峰,等. 考虑源荷协调的风电并网系统旋转备用容量优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8):185-192.  
CHEN Houhe, WANG Yang, ZHANG Rufeng, et al. Spinning reserve capacity optimization considering coordination between source and load for power system with wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):185-192.
- [25] 犹锋,张华鲁,石杰,等. 基于云边协同技术的柔性负荷聚合调控系统设计[J]. 供用电, 2021, 38(12):64-73.  
YOU Feng, ZHANG Hualu, SHI Jie, et al. Design of flexible load aggregation regulation system based on cloud edge collaboration technology [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12):64-73.
- [26] 李红伟,林山峰,吴华兵,等. 基于动态规划算法的配电网



孤岛划分策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1):47-52.

LI Hongwei, LIN Shanfeng, WU Huabing, et al. Islanding strategy based on dynamic programming algorithm for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):47-52.

[27] SHI Y Y, XU B L, WANG D, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3):2882-2894.

[28] 赵丽萍, 张书伟, 张雪岩, 等. 基于随机机会约束规划的面向能源互联的主动配电网选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14):121-129.

ZHAO Liping, ZHANG Shuwei, ZHANG Xueyan, et al. Locat-

ing and sizing method for energy interconnection oriented active distribution networks based on stochastic chance constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14):121-129.

作者简介:



詹红霞

詹红霞(1971),女,硕士,副教授,研究方向为电力系统保护与控制 and 新能源并网(E-mail:3525806@qq.com);

肖竣文(1994),男,硕士在读,研究方向为配电网故障恢复;

邓小勇(1975),男,硕士,高级工程师,从事电网生产管理工作。

### Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/photovoltaic penetration considering flexible load

ZHAN Hongxia<sup>1</sup>, XIAO Junwen<sup>1</sup>, DENG Xiaoyong<sup>2</sup>, CHEN Tie<sup>2</sup>, ZHANG Xi<sup>2</sup>, HE Jiangtao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Shinan Power Supply Branch Company of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** There are problems such as uncertain power output and load fluctuation when the distribution network with distributed generator (DG) operates on an island. In order to ensure stable and reliable power supply for islands, a dynamic island partition strategy is proposed which takes into account the standby demand of islands and gives full play to the flexible load regulation ability. Considering the uncertainty of wind power and photovoltaics, a prediction error model is established at first. The depth-first search algorithm is used to obtain the maximum power supply range for each time period, and chance constrained programming is used to deal with the random variables in the model, the island standby demands for each time period is obtained by the maximum power supply range. Then, modified particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to give full play to the control ability of flexible load, and the optimal islanding results that meets the standby demand under each confidence levels is obtained with the objective of maximizing the comprehensive recovery value during the failure recovery period. Finally, a modified IEEE 33 node power distribution system is taken as an example to verify that the proposed strategy can effectively increase the value of islands while ensuring the reliability of islands.

**Keywords:** flexible load; high proportion of wind/photovoltaic penetration; island partition; standby demand; particle swarm optimization (PSO) algorithm; chance constrained programming

(编辑 陆海霞)