

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.01.008

# 极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略

张瑞曦<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>, 程煜<sup>1</sup>, 宋菁<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**随着极端自然灾害的日益频繁,为了充分发挥燃气轮机、燃料电池等可控分布式电源(DG)在极端情况下的支撑作用,文中提出了一种极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略,提升可控DG对重要负荷供应的电量价值。首先,利用 Wasserstein 距离求解负荷概率分布的相似性,将各个负荷划分为不同的时间场景。其次,读取线路当前的状态信息,建立满足辐射状微网形成问题的约束条件,以最大化恢复负荷价值为目标函数,利用混合整数线性规划的方法求解微网形成的静态最优方案。最后,结合负荷的状态变化,求解无重构次数限制下的动态最优解,并考虑重构次数限制,以动态过程恢复负荷价值最大为优化目标,确定最优方案。结果表明,以 Wasserstein 距离负荷状态划分为基础的动态重构,提升了配电网在极端环境下支撑负荷的电量价值。

**关键词:**极端灾害;分布式电源;负荷概率分布;Wasserstein 距离;动态重构;混合整数线性规划

**中图分类号:** TM711

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)01-0056-08

## 0 引言

近些年,全球范围内的极端气象频繁发生,造成大规模停电及经济损失,这使得配电网应对极端自然灾害的能力得到广泛关注<sup>[1-2]</sup>。配电系统在台风、地震等极端自然灾害下,元件故障率大幅度升高,严重影响供电的安全性和可靠性<sup>[3]</sup>。而随着燃气轮机<sup>[4]</sup>、燃料电池等可控分布式电源(distributed generation, DG)的不断发展,其在极端事件下对重要负荷的支撑作用也逐渐被发掘。

可控DG需通过微网的方式,对脱离主网的负荷进行应急供电<sup>[5]</sup>,并在灾害中合理重构,尽可能提高过程中恢复负荷的总价值,如此才能体现对重要负荷的支撑作用。微网的重构分成了静态和动态2种方式<sup>[6]</sup>。静态重构,即在一个负荷断面上对微网的结构进行优化。文献[7]采用静态重构的方法,选取负荷的额定值作为负荷断面,优化区域孤立状况下的静态重构方案。负荷一般不会超过额定值,因此该方法具有良好的适应性和稳定性,但当负荷与额定值偏差较大时,该方法灵活性较差,优化的结果也并非是最优解。动态重构,通常采用分段的方法,将动态重构问题转化为若干静态重构问题。文献[8]提出了基于信息熵的日负荷曲线分段方法;文献[9]采用聚类的方法,通过比较相邻时刻负荷所属类别来划分时段;文献[10-12]通过比

较相邻时段的判断量和阈值大小来合并时段,判断量包括网损标准差、功率矩以及切换收益等。

上述配电网动态重构研究大多在正常运行状态下,以网损最小为优化目标。而在极端灾害条件下,以恢复负荷价值最大为优化目标的动态重构存在2个问题:一是极端灾害条件下的负荷由多个DG供电,微网结构受其空间分布影响较大,且目标函数具有较强的个体敏感性,因此不能采用负荷整体变化状况划分重构时段;二是微网电源功率不足,决策偏于保守,预测值与实际值可能存在较大差别,负荷值应以该时段负荷的最大值为准,而不是平均值。因此在时段划分时,不能简单考虑负荷的平均值,而应考虑某时刻负荷的概率分布情况。

文中在极端灾害的场景下研究配电网动态重构策略,充分考虑负荷个体的状态变化,将基于 Wasserstein 距离的负荷状态划分与静态断面优化相结合,形成动态重构的最优方案。此方案在提升重构灵活性的同时保留决策的保守性,提升了配电网在极端环境下的系统性能。

## 1 负荷状态的划分方法

### 1.1 划分步骤

在极端灾害条件下,以额定功率作为决策输入量的微网静态重构方法缺乏灵活性,因此提出了一种微网动态重构方法。考虑到多电源供电的微网结构受负荷空间分布的影响较大,以及恢复负荷价值最大这一目标函数的个体敏感性,文中所提的状态划分以单一负荷为划分对象。另外,考虑到极端

收稿日期:2021-09-03;修回日期:2021-11-19

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJX-M20170149)

灾害条件下决策的保守性和预测曲线偏差所带来的风险,文中通过研究负荷概率分布的变化代替预测曲线的变化,确定状态划分时刻。

负荷状态的划分步骤包括:(1)选取典型灾害日的负荷样本,例如针对广东地区台风天气,选取台风频发的7月至9月的历史负荷数据作为样本;(2)将用电量最小值至最大值之间分成若干等分;(3)计算全天每个小时的概率分布;(4)计算相邻小时概率分布的 Wasserstein 距离大小,将距离较小的小时合并,将距离较大的小时分开,完成对负荷状态的划分。

### 1.2 Wasserstein 距离计算原理

Wasserstein 距离,又称推土机距离,指的是把概率分布  $q$  转换为  $p$  的最小传输质量,用于衡量 2 个概率分布之间的差异<sup>[13]</sup>,广泛应用于计算机科学<sup>[14]</sup>、图像识别<sup>[15]</sup>等领域。传统的欧式距离,通过对 2 条曲线对应位置的差值平方和取平方根来衡量距离大小。但当 2 条曲线距离较远,没有重叠或重叠较少时,欧式距离无法反映  $p, q$  分布之间的相对位置关系。因此,文中引入 Wasserstein 距离,通过研究概率分布的变化来解决负荷概率分布距离的问题。每小时的负荷概率分布建模为离散分布,离散分布的 Wasserstein 距离计算过程如图 1 所示。

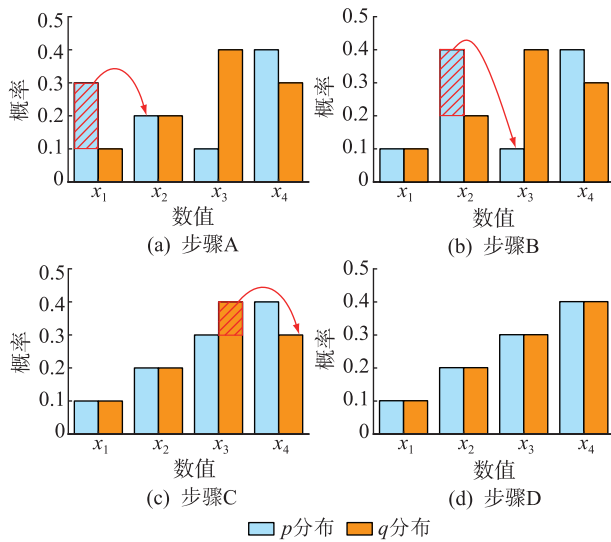


图 1 离散分布 Wasserstein 距离计算过程

Fig.1 Process of Wasserstein distance calculation between discrete distributions

计算每一个步骤需要移动的“质量”再乘以该步骤移动的“距离”,最后将这些乘积求和,便可获得将分布  $p$  与分布  $q$  “推”成相同分布所要做的“功”,从而反映 2 个分布之间的差异。

### 1.3 负荷状态划分算例

选取灾害典型月份的某负荷 30 d 样本,将负荷

最小值和最大值之间划分为 10 个区间,离散化负荷概率分布如图 2 所示,其中,①~⑩为区间编号。

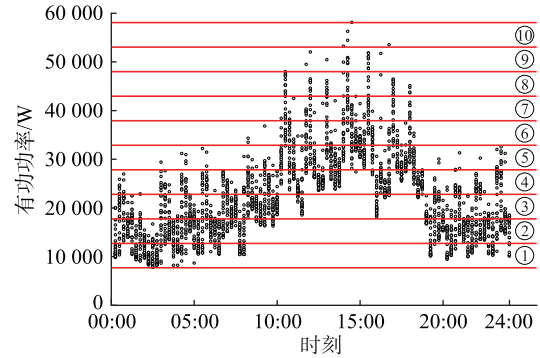


图 2 概率分布的区间划分

Fig.2 The interval division of probability distribution

由图 2 可见,样本在 00:00—10:00 及 20:00 之后,负荷集中在下方 4 个区间,而在 10:00—20:00 集中于上方 6 个区间,反映了负荷的用电习惯。

假设用户 1 h 内的用电状态相同,将每 15 min 计量一次的样本数据,按照每小时统计一个概率分布,部分时段的概率分布如图 3 所示。

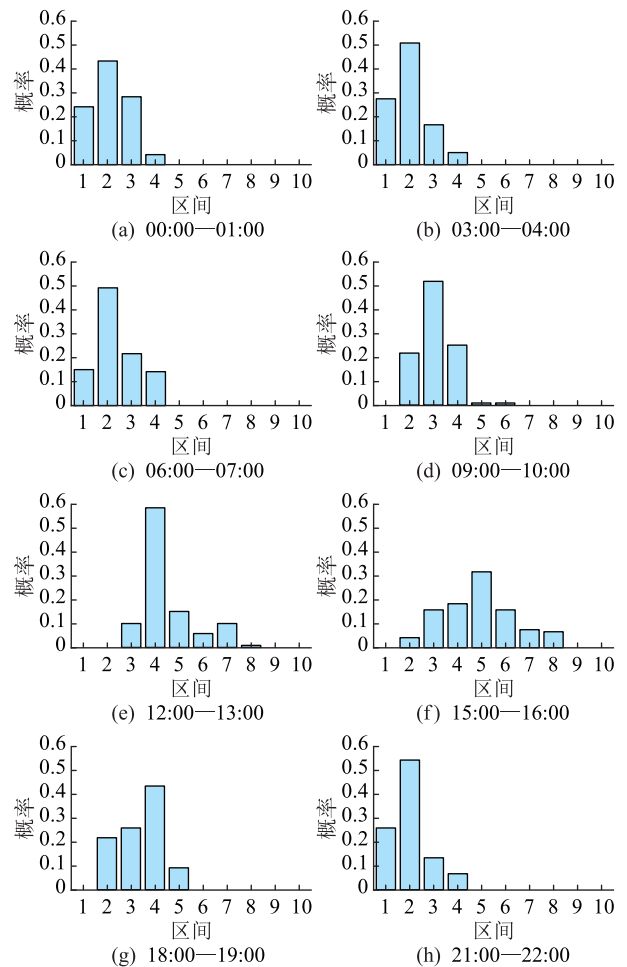


图 3 24 h 负荷概率分布

Fig.3 Load probability distributions of 24 hours

图3中,区间对应图2中有功功率从最大值到最小值划分的10个部分,概率为图2中的点落在各个区间内的占比。图3描绘了用户1 d用电水平的状态变化,早间时段负荷主要分布于功率水平较低的区间,午间时段负荷逐步转移到水平较高的区间,而晚间时段负荷分布返回水平较低的区间,同时体现了各时段内负荷的不确定性。

计算相邻时段负荷概率分布的 Wasserstein 距离,如图4所示。

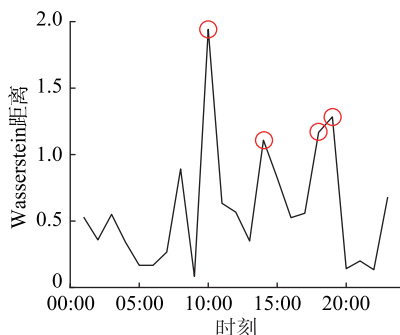


图4 24 h 负荷概率分布的 Wasserstein 距离  
Fig.4 Wasserstein distance between 24 hours load probability distributions

图4中,10:00,14:00,18:00,19:00处的 Wasserstein 距离很大,表明在这些时段负荷水平的概率分布与上一时段发生了较大的变化,以此来表征用户用电行为的规律性变化,而随机性变化的影响通过概率分布的方式减弱了。

以相邻 Wasserstein 距离作为合并的依据,其定义为全部“质量”移动单位距离,即到相邻区间所做的“功”。全部“质量”概率分布之和为1,单位距离也为1,因此相邻 Wasserstein 距离为1。将距离小于相邻 Wasserstein 距离的时间段进行合并,大于相邻 Wasserstein 距离的时间段进行划分,图4中的圆圈处即为划分时刻。最终每日的负荷被划分为5个状态,用户状态划分结果如图5所示。

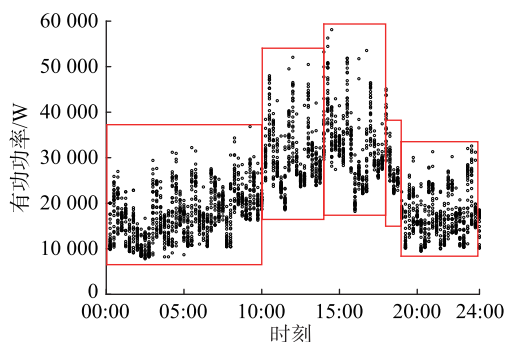


图5 负荷状态划分结果

Fig.5 Result of load situations division

在不同的时间阶段,将负荷划分成不同的用电

状态。在每一个用电状态中,为保证在这一时段任何时刻微网的供电能力均大于该负荷的电力需求,可以取每个状态的最大值作为微网形成决策的输入量,并设置一定的风险阈值来排除个别数据带来的影响,例如设置阈值为99%,即实际负荷高于决策提供负荷具有1%的风险。显然,相比于直接取负荷的额定功率作为输入量,上述方法可使微网随用户用电状态变化来进行调整,更具灵活性。

## 2 微网静态重构策略

将所有负荷划分成不同状态,这些状态的组合形成不同时刻的静态断面,将其作为本节模型的输入决策量。文中建模场景主要为含多个可控 DG 的辐射状配电网。系统配备远程控制开关等,使得开关动作可以完成,备用设备、恢复措施可以快速投入<sup>[16-17]</sup>。在极端灾害的场景下,将脱离主网的配电网划分为若干个微网,使得整个配电网恢复供电负荷的总价值最大。假设系统所有节点的集合为  $N$ ,可控 DG 的集合为  $G$ 。由于一个 DG 给一个微网供电,最终形成多个微网,因此微网的集合  $K$  与  $G$  相同。其中,某个微网由该微网的 DG 所在节点的编号表示,即若微网  $k$  的 DG 位于节点  $k_g$  处,则  $k = k_g$ 。

### 2.1 目标函数

极端灾害发生时,恢复负荷的价值主要与负荷的重要程度以及功率有关,在关键负荷的量化评估方面<sup>[18-20]</sup>文中不再赘述。负荷的重要程度用负荷权重  $w_i$  来表示,恢复负荷的功率大小由第一章负荷状态划分确定。恢复负荷的总价值可以用整个系统内所有负荷的负荷权重与恢复功率的乘积来表示,由于该值的单位与功率的单位相同,下文均称为“功率价值”。目标函数为:

$$\max \left[ \sum_{i \in N} w_i \sum_{k \in K} (r_{ik} p_i) \right] \quad (1)$$

式中:  $w_i$  为节点  $i$  处负荷重要性权重;  $r_{ik}$  为节点供电状态,当节点被某一可控 DG 供电时,  $r_{ik} = 1$ ,否则  $r_{ik} = 0$ ;  $p_i$  为节点  $i$  处负荷某状态下的最大功率需求。“功率价值”随时间的积分称为“电量价值”。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 节点微网关系约束

在模型中,每一个微网仅由一个可控 DG 供电,任意2个微网之间没有相同的节点,即:

$$\sum_{k \in K} g_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

式中:  $g_{ik}$  为节点微网关系,当节点  $i$  属于微网  $k$  时,  $g_{ik} = 1$ ,否则  $g_{ik} = 0$ 。同时,含有可控 DG 的节点  $k_g$

必定属于自己供给的微网  $k$ , 则有:

$$g_{k_g k} = 1 \quad k \in K; k_g = k \quad (3)$$

### 2.2.2 辐射状拓扑节点关系约束

若节点  $j$  为节点  $i$  的直接子节点, 且节点  $j$  属于微网  $k$ , 则节点  $i$  必然属于微网  $k$ 。

$$g_{jk} \leq g_{ik} \quad j \in C(i, k) \quad (4)$$

式中:  $C(i, k)$  为在微网  $k$  的辐射状拓扑中节点  $i$  的直接子节点。

### 2.2.3 线路开关状态约束

线路的开关状态与节点是否属于微网  $k$  存在如下约束关系:

$$\begin{cases} g_{ik} = g_{jk} \\ l_{ij} = 1 \end{cases} \quad j \in C(i, k) \quad (5)$$

$$\begin{cases} g_{jk} = 0 \\ l_{ij} = 0 \end{cases} \quad j \in C(i, k) \quad (6)$$

其中,  $l_{ij} = 1$  和  $l_{ij} = 0$  分别表示节点  $i, j$  之间的线路闭合与断开。

### 2.2.4 节点负荷支撑约束

当节点  $i$  属于某一微网  $k$ , 同时该节点的负荷连接微网的开关闭合时, 节点  $i$  被微网  $k$  供电, 即:

$$r_{ik} = g_{ik} s_i \quad (7)$$

式中:  $s_i$  为节点开关状态, 当节点  $i$  处负荷连接到微网时,  $s_i = 1$ , 否则  $s_i = 0$ 。式(7)为非线性等式约束, 考虑到 3 个变量均为 0-1 变量, 可将其转化为式(8)的线性不等式约束。

$$\begin{cases} r_{ik} \leq g_{ik} \\ r_{ik} \leq s_i \\ r_{ik} \geq g_{ik} + s_i - 1 \end{cases} \quad (8)$$

### 2.2.5 微电网运行约束

微电网运行约束包括功率平衡约束、线路潮流约束、电压约束。潮流模型采用文献[21]中的配电网潮流模型, 并将潮流线性近似形成约束条件<sup>[22]</sup>。

#### (1) 最大功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,k} \leq g_{ik} P_{k,\max} \\ 0 \leq Q_{i,k} \leq g_{ik} Q_{k,\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{i,k}$ ,  $Q_{i,k}$  分别为在第  $k$  个微网中流入节点  $i$  的有功功率和无功功率;  $P_{k,\max}$ ,  $Q_{k,\max}$  分别为微网  $k$  的可控 DG 所能提供的最大有功功率和无功功率。

#### (2) 功率平衡约束。

$$\begin{cases} \sum_{j \in C(i,k)} P_{j,k} = P_{i,k} - g_{ik} P_i \\ \sum_{j \in C(i,k)} Q_{j,k} = Q_{i,k} - g_{ik} Q_i \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $p_i$ ,  $q_i$  分别为节点  $i$  消耗的有功功率和无功功率。

#### (3) 线路潮流约束。

$$P_{j,k} \leq P_{l_{ij}} \quad j \in C(i, k) \quad (11)$$

式中:  $P_{l_{ij}}$  为线路  $l_{ij}$  的额定有功功率。

#### (4) 电压关系约束。

$$\begin{cases} V_{j,k} = V_{i,k} - \frac{r_{ij} P_{j,k} + x_{ij} Q_{j,k}}{V_{0,k}} - o_{j,k} \\ 0 \leq V_{i,k} \leq g_{ik} V_{0,k} \end{cases} \quad j \in C(i, k) \quad (12)$$

式中:  $V_{i,k}$ ,  $V_{j,k}$  分别为节点  $i, j$  的电压;  $r_{ij}$ ,  $x_{ij}$  分别为线路  $l_{ij}$  的电阻和电抗;  $V_{0,k}$  为可控 DG 参考电压;  $o_{j,k}$  为松弛变量, 能使得当节点  $j$  与节点  $i$  不属于同一微网时上述约束仍有效, 松弛变量约束为式(13)。

$$0 \leq o_{j,k} \leq (1 - g_{jk}) V_{0,k} \quad (13)$$

同时, 节点电压必须在线路额定电压容差的范围内, 即:

$$V_R(1 - \eta) \leq V_{i,k} \leq V_R(1 + \eta) \quad (14)$$

式中:  $V_R$  为线路额定电压;  $\eta$  为线路电压允许误差百分比。

## 2.3 求解方法

通过上述建模, 将微网形成优化问题转化为一个混合整数线性规划问题。分支定界法是求解此类整数规划问题的常用方法, 其主要流程如下:

(1) 求解松弛问题。先不考虑整数限制求解原问题, 若求得最优解, 检查是否符合整数约束, 满足则为最优解, 不满足则进入下一步。

(2) 分支。选择不符合整数约束的变量  $x_j$ , 其值为  $b_j$ , 构造 2 个约束  $x \leq [b_j]$ ,  $x \geq [b_j] + 1$ , 分别加入原问题中, 形成 2 个子问题,  $[b_j]$  为小于  $b_j$  的最大整数。

(3) 定界。检查子问题的解是否符合整数条件。将所有子问题中的目标函数最大值作为最优值  $z^*$  的上界  $U_z$ , 已经符合整数条件的分支中目标函数最大的作为下界  $L_z$ 。

(4) 对于目标函数大于下界  $L_z$  的子问题, 从目标函数最大的子问题开始, 逐一支, 并更新问题的下界  $L_z$ 。

(5) 当所有子问题的目标函数值都小于或等于  $L_z$  时,  $L_z$  对应的整数解则为最优解。

此方法可以利用 Cplex 求解器, 方便快捷求得在最大程度恢复负荷价值前提下的微网结构以及各微网所支撑的节点负荷。

## 3 微网动态重构寻优方法

求出每一个负荷断面的静态优化结果, 就可获得全周期最佳运行状态。在无重构次数限制条件下, 优化结果中需要重构的次数与负荷状态变化以

及负荷水平有关,负荷水平较低,用电需求均能满足,变化不大的时段优化结果往往无须重构。但实际上每天网络重构的次数是有限的,实际优化结果一般在7次以内。若优化结果为7次,则当重构次数限制为3时,最多有35种情况;当重构限制次数为1或6时,有1种情况,因此可以采取枚举法。但当优化结果重构次数较多,最多23次(文中的状态是以1h为基本单位,在这1h中所有负荷的状态视为不变,全天24h共有23个状态,因此最极端的情况是每小时之间都发生拓扑变化,最多23次),重构次数限制为11或12,此时产生的情况最多,有1 352 078种。对于此类情况,可以采用遗传算法<sup>[8]</sup>代替枚举法生成重构方案寻优。

### 4 算例分析

文中采用的 IEEE 37 节点系统<sup>[7]</sup>如图 6 所示,其中节点 702、节点 710、节点 728 含有可控 DG。线路、负荷的恒开、恒闭状态可能由失去远程控制能力造成,也可以是其他强制性原因,例如某些节点不允许失负荷,因此可设置为恒闭负荷。

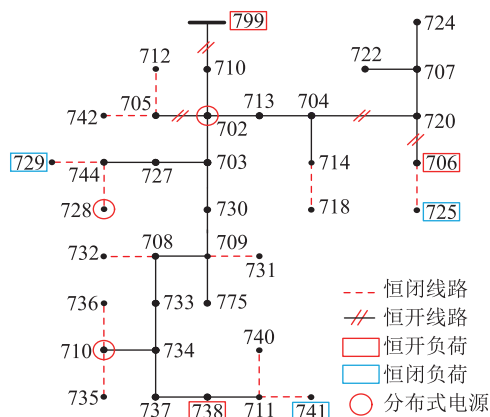


图 6 IEEE 37 节点系统  
Fig.6 IEEE 37-bus test system

各个节点的额定功率、权重以及节点状态信息可参考文献<sup>[7]</sup>。DG 所在的节点及其最大功率如表 1 所示。

表 1 DG 基本信息

节点	P/kW	Q/kvar
702	252.53	46.31
728	120.42	171.72
710	202.99	197.48

采用静态划分方法<sup>[7]</sup>,利用节点的额定功率以及线路状况对微网进行建模,通过 Cplex 求解器求解,最终静态最优结果下的微网划分如图 7 所示。

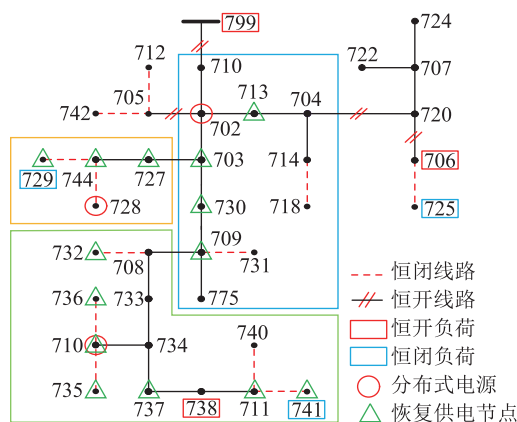
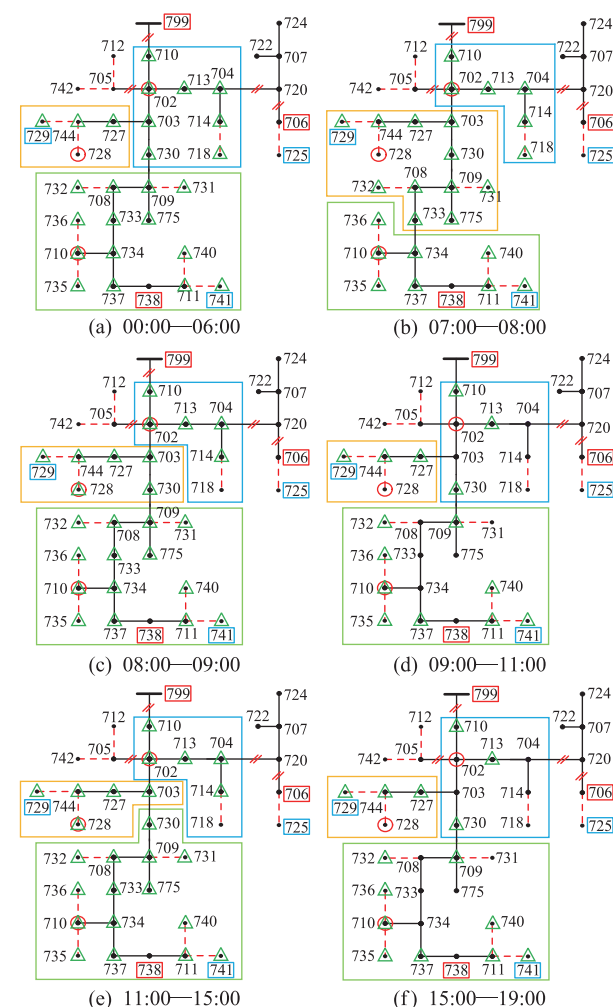


图 7 微网静态重构的优化结果

Fig.7 The optimization result of microgrid static reconstruction

图 7 中,3 块多边形区域为 3 个不同的微网,分别由 3 个可控 DG 供电。采用额定功率对微网进行静态划分的结果与文献<sup>[7]</sup>一致。

考虑负荷状态变化,根据第一章负荷状态划分方法,获得各时段下节点负荷的功率变化状况,在不考虑重构次数限制的情况下,微网的动态最优重构方式如图 8 所示。



(a) 00:00—06:00

(b) 07:00—08:00

(c) 08:00—09:00

(d) 09:00—11:00

(e) 11:00—15:00

(f) 15:00—19:00

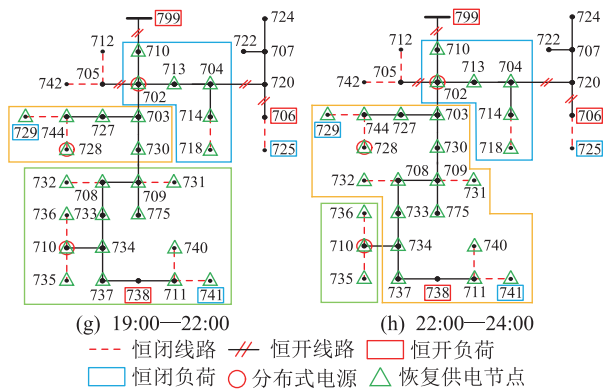


图8 不考虑重构次数限制的动态最优重构方案

Fig.8 A dynamic optimal reconstruction scheme without considering the limit of reconstruction times

由图8可知,在不考虑微网重构次数的情况下,在07:00,08:00,09:00,11:00,15:00,19:00,22:00时刻重构微网结构,能在负荷变化的动态过程中使恢复供电负荷总价值最大。

考虑微网重构次数限制,设整日重构次数不超过3次,共有35种重构方案。枚举法具体操作方法为:将存在重构动作的7个时间点编号,利用Matlab中的组合函数,给出从7个时间点抽出3个的所有方案,并把所有抽到的方案输入到模型中,计算各方案全周期恢复的总电量价值,结果如图9所示。重构次数限制下动态重构方案的对比如表2所示。

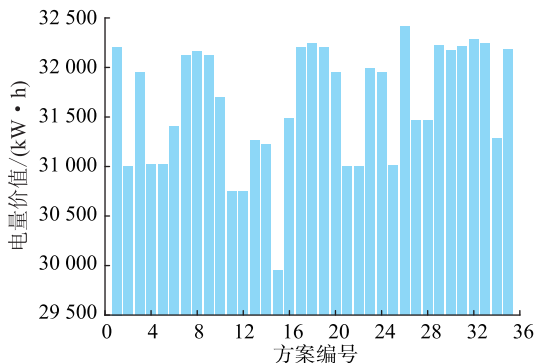


图9 重构次数限制下方案恢复总电量价值的比较

Fig.9 Comparison of the total power recovery value under the limit of reconstruction times

表2 不同动态重构方案对比

Table 2 Comparison of different dynamic reconstruction schemes

方案编号	重构策略	总电量价值/(kW·h)
15	06:00,18:00,21:00 重构	29 941.86
18	07:00,08:00,18:00 重构	32 238.94
26	08:00,10:00,14:00 重构	32 410.79

由图9和表2可得,在考虑重构次数限制的条件下,方案26选择功率价值提升最大的时段重构,即在08:00,10:00,14:00这3个时刻对微网进行重

构,总电量价值最大。

是否考虑重构次数的静、动态重构方案的恢复负荷总功率价值变化如图10所示。

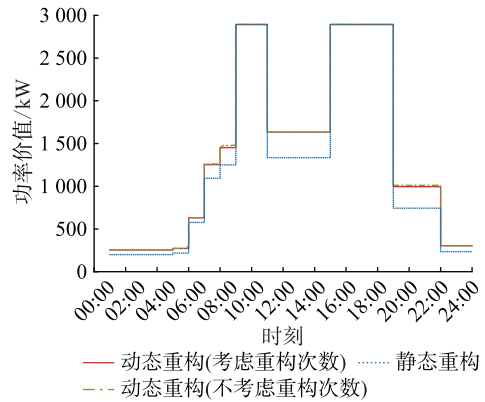


图10 微网动态重构与静态重构过程对比

Fig.10 Comparison of dynamic and static reconstruction of microgrid

由图10可知,静态重构的优化结果以负荷额定功率作为输入量,当实际负荷接近额定值时,静态重构与动态重构的结果相近,但随着负荷水平的降低,动态优化可以通过转移供电的方式支撑更多负荷,提升恢复的电量价值。计算图10中的功率价值曲线和时间轴包围的面积,获得3种情况下恢复的总电量价值,如表3所示。

表3 不同重构方法对比

Table 3 Comparison of different reconstruction methods

重构方法	恢复总电量价值/(kW·h)
静态重构	29 567.48
动态重构(不限制重构次数)	32 489.63
动态重构(限制重构3次)	32 410.79

不考虑重构次数的动态重构为理想状态,实际应用中需要根据重构次数限制,保留重构效果最好的方案26,其恢复总电量价值为32 410.79 kW·h。

## 5 结语

文中分析了负荷的概率分布特性,充分考虑了目标函数的特殊性以及决策的保守性,利用Wasserstein距离将负荷状态划分为不同的时段,作为微网划分策略优化模型的输入。同时,动态重构使得微网划分更加灵活,可在脱离主网的情况下最大化可控DG恢复负荷的总价值,从整体上提高配电网应对极端灾害的能力。目前,对配电网基础网架进行划分可以充分发挥联络线及柔性负荷的作用。文中主要从拓扑方面提升系统性能,而源荷储的优化调度对系统性能的提升也是值得深入研究的。

## 参考文献:

- [1] 李雪,孙霆锴,侯恺,等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5476-5493.  
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5476-5493.
- [2] 高鑫,唐飞,张童彦,等. 配电网防风抗灾加固措施优化决策方法[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 78-85.  
GAO Xin, TANG Fei, ZHANG Tongyan, et al. Optimal decision-making method of wind-proof and disaster-resistant reinforcement measures for distribution network[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 69-77.
- [3] 高海翔,陈颖,黄少伟,等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-8.  
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [4] 管金,何宗泽,吕小静,等. 30 kW 微型燃气轮机发电机组启动实验研究[J]. 发电技术, 2021, 42(4): 404-411.  
GUAN Jin, HE Zongze, LYU Xiaojing, et al. Experimental study on startup of 30 kW micro gas turbine generator set[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(4): 404-411.
- [5] 董旭柱,黄邵远,陈柔伊,等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21.  
DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [6] 田书欣,刘浪,魏书荣,等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 1-11.  
TIAN Shuxin, LIU Lang, WEI Shurong, et al. Dynamic reconfiguration of a distribution network based on an improved grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 1-11.
- [7] CHEN C, WANG J H, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [8] 赵静翔,牛焕娜,王钰竹. 基于信息熵时段划分的主动配电网动态重构[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 402-408.  
ZHAO Jingxiang, NIU Huanna, WANG Yuzhu. Dynamic reconfiguration of active distribution network based on information entropy of time intervals[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 402-408.
- [9] 周洁洁,阙凌燕,王良毅,等. 采用改进最优模糊 C 均值聚类和改进和声搜索算法的配电网动态重构[J]. 机电工程, 2015, 32(4): 531-536, 543.  
ZHOU Jiejie, QUE Lingyan, WANG Liangyi, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved optimal fuzzy C-means clustering and improved harmony search algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4): 531-536, 543.
- [10] 田昊,吕林,高红均,等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.  
TIAN Hao, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [11] 江东林,刘天琪,李樊. 采用时段动态划分和分层优化策略的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 153-157.  
JIANG Donglin, LIU Tianqi, LI Fan. Dynamic distribution network reconfiguration based on dynamic partition of time intervals and hierarchical optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 153-157.
- [12] 瞿合祚,李晓明,杨玲君,等. 考虑负荷和分布式电源时变性的配电网多目标动态重构和 DG 调度[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 873-881.  
QU Hezuo, LI Xiaoming, YANG Lingjun, et al. Multi-objective distribution network dynamic reconfiguration and DG control considering time variation of load and DG[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 873-881.
- [13] 肖先勇,桂良宇,李成鑫,等. 基于 Wasserstein 距离的多电压暂降事件同源检测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4684-4693.  
XIAO Xianyong, GUI Liangyu, LI Chengxin, et al. Multiple voltage sag events homology detection based on Wasserstein distance[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4684-4693.
- [14] 武文杰,王红蕾. 基于生成对抗网络的遮挡人脸图像修复的改进与实现[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(1): 217-221, 249.  
WU Wenjie, WANG Honglei. Improvement and implementation of occlusion face image inpainting based on generative adversarial network[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(1): 217-221, 249.
- [15] TAHRI O, USMAN M, DEMONCEAUX C, et al. Fast earth mover's distance computation for catadioptric image sequences [C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Phoenix, AZ, USA. IEEE, 2016: 2485-2489.
- [16] XU Y, LIU C C, SCHNEIDER K P, et al. Placement of remote-controlled switches to enhance distribution system restoration capability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1139-1150.
- [17] LEI S B, WANG J H, HOU Y H. Remote-controlled switch allocation enabling prompt restoration of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3129-3142.
- [18] 徐青山,丁一帆,颜庆国,等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6791-6800, 7070.  
XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6791-6800, 7070.
- [19] 左琦,贺海磊,梁才浩,等. 计及有序充电的电动汽车接纳

- 能力量化评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6):1-6.
- ZUO Qi, HE Hailei, LIANG Caihao, et al. Quantitative evaluation method of system acceptance capacity of electric vehicles in ordered charging mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(6):1-6.
- [20] 吴国沛, 张行, 王红斌, 等. 用户可中断负荷特性模糊综合评价策略研究[J]. 供用电, 2020, 37(3):78-83.
- WU Guopei, ZHANG Hang, WANG Hongbin, et al. Research on fuzzy comprehensive evaluation strategy of user interruptible load characteristics [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3):78-83.
- [21] 王涛, 刘雪飞, 郑重, 等. 基于潮流线性化的分布式发电选址定容新算法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8):117-128.
- WANG Tao, LIU Xuefei, ZHENG Zhong, et al. Novel locating and sizing algorithm for distributed generation based on power flow linearization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):117-128.
- [22] 孙鑫, 饶宇飞, 肖浩, 等. 基于线性化最优潮流的电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10):194-199.
- SUN Xin, RAO Yufei, XIAO Hao, et al. Available transfer capability calculation based on linearized optimal power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):194-199.

---

作者简介:



张瑞曦

张瑞曦(1994),男,硕士在读,研究方向为弹性配电网(E-mail:zhang\_ruixi@163.com);  
徐青山(1979),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制;  
程煜(1995),男,硕士在读,研究方向为储能配置。

## Microgrid formation strategy considering dynamic reconstruction under extreme disasters

ZHANG Ruixi<sup>1</sup>, XU Qingshan<sup>1</sup>, CHENG Yu<sup>1</sup>, SONG Jing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** With the frequent occurrence of extreme natural disasters, in order to make the supporting effect of distributed generation (DG) work, such as gas turbine and fuel cell, a microgrid formation strategy considering dynamic reconstruction under extreme natural disasters is proposed, which increases the value of controllable DG to support critical loads. Firstly, Wasserstein distance is used to calculate the similarity of load probability distribution. And each load is divided into different time scenarios. Then, the current state information of the line is read. And the constraints satisfying the formation problem of radial microgrid are established. Taking maximizing the load recovery value as the objective function, the method of mixed integer linear programming is used to solve the static optimal solution for the formation of microgrid. At last, combined with the state change of loads, the dynamic optimal solution is solved without the limit of reconstruction times to find out the moment of structure change. After that, the limit of the number of reconstruction times is taken into account, and the optimal plan is determined to maximize value of the load in the dynamic process. The results show that the dynamic reconfiguration based on Wasserstein distance improves the electric quantity value of the loads supported by distribution network in extreme environment.

**Keywords:** extreme disasters; distributed generation; load probability distribution; Wasserstein distance; dynamic reconfiguration; mixed integer linear programming

(编辑 陆海霞)