

1-15-2024

Active distribution network power supply unit division considering fuzzy chance constrain

Rong LIANG

Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250022, China, duuyongmei@163.com

Bo YANG

Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250022, China

Zhao LIU

Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250022, China

Yanshuo WANG

Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250022, China

Ren ZHAO

Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250022, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

LIANG, Rong; YANG, Bo; LIU, Zhao; WANG, Yanshuo; ZHAO, Ren; and WANG, Kexin (2024) "Active distribution network power supply unit division considering fuzzy chance constrain," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 5, Article 19.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.019

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/19>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

Active distribution network power supply unit division considering fuzzy chance constrain

Authors

Rong LIANG, Bo YANG, Zhao LIU, Yanshuo WANG, Ren ZHAO, and Kexin WANG

基于模糊机会约束的有源配电网供电单元划分

梁 荣, 杨 波, 刘 钊, 王延朔, 赵 韧, 王可欣

(国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250022)

摘 要:为考虑分布式电源接入及源荷不确定性对配电网供电单元划分的影响,提出一种考虑模糊机会约束的有源配电网供电单元划分方法。首先,建立考虑分布式电源接入及其不确定性影响的供电单元划分框架;其次,以供电单元数量最少和负荷均衡度最优为目标,建立考虑模糊机会约束的供电单元划分模型;再次,基于模糊变量的清晰等价处理,提出站间站内供电单元迭代求解方法;最后,通过算例仿真对所提出的模型和方法进行说明,并验证其有效性与实用性。

关 键 词:供电单元;有源配电网;模糊机会约束

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.019

中图分类号:TM715

文章编号:1673-9140(2023)05-0187-09

Active distribution network power supply unit division considering fuzzy chance constrain

LIANG Rong, YANG Bo, LIU Zhao, WANG Yanshuo, ZHAO Ren, WANG Kexin

(Economic and Technological Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250022, China)

Abstract: To consider the impact of distributed power source integration and source-load uncertainty on the division of supply units in the distribution network, a method that takes into account fuzzy chance constraints is proposed for supply unit division in an active distribution network. Firstly, a supply unit division framework that takes into account the impact of distributed power source integration and its uncertainty is established. Secondly, with the goals of minimizing the number of supply units and optimizing load balance, a supply unit division model that considers fuzzy chance constraints is built. Thirdly, based on the clear equivalence treatment of fuzzy variables, an iterative solution method is proposed for supply unit division between and within stations. Finally, the proposed model and method are explained by calculation example simulation. And their effectiveness and practicality are verified.

Key words: power supply unit; active distribution network; fuzzy chance constraint

为应对电力体制改革、综合能源系统等新形势对电网企业投资效益和成本管控的新要求,早日完成安全可靠、经济高效、灵活先进、绿色低碳和环境友好的智能配电网建设目标,国家电网有限公司提出了模块化精益规划的思路^[1]。其中,供电单元划分是配电网模块化规划中承接供电网格划分与自

动布线的重要环节。

配电网规划设计技术导则^[2]明确规定,供电单元为1~4组10 kV馈线的互联。对于如何落实导则内容,很多学者做了大量主观和客观的划分工作。主观方法遵循负荷密度相近、电能质量要求相近等基本原则^[3-4],符合联络有序、负荷均衡等划分

收稿日期:2022-09-24;修回日期:2023-04-25

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520625210019)

通信作者:梁 荣(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统规划及运行研究;E-mail:duuyongmei@163.com

标准^[5-6],使用德尔菲法确定划分因素权重^[7]完成供电单元的划分。然而该方式多基于研究人员的工作经验进行,易出现主观强、效果差等问题。后一类方法则通过考虑负荷权重的改进K-means聚类算法^[8]、图像处理^[9]、遗传K-均值空间聚类算法^[10]、交替定位分配法^[11]等智能算法或枚举法^[12]建立数学优化模型进行供电单元的划分。与前者方法相比,客观方法能够得到更加客观严谨的划分方案。

上述供电单元划分方法均将负荷看成边界条件,传统方法采用基于同时率得到的最大负荷^[13-14]作为负荷数据。而最大负荷时刻不一定是每条馈线负荷最大时刻,这样会导致满足总体安全约束下,单一馈线最大时刻可能会出现越限等危险情况。所以,供电单元划分还需结合负荷时序特性。目前研究有基于负荷位置及大小形成站间、站内各分段间的联络组合的划分方法^[15],总体划分后根据负荷特性匹配效果局部调整的划分方法^[16],基于馈线区块划分结果根据考虑负荷特性互补的供电单元划分效果评估指标得出多组划分方案^[17]等方法。然而上述供电单元划分方案的优选是基于网架规划的经济性,最优划分方案可能很难独立得出,并且没有考虑分布式电源接入及其不确定性特征的影响。

随着新型配电系统的建设,分布式电源未来将以高渗透率的形式并入配电网。分布式电源接入不同的地理位置将影响不同负荷点的负荷量,最终使供电单元划分数量和结果发生变化。同时,适当的分布式电源接入能够降低净负荷特性,若按照N-1准则设置线路最大负载率,当某条馈线故障后,互联的非故障馈线对其转供后仍可能留有一定的供电裕度。

此外,分布式电源出力的间歇性和波动性将给配电网安全稳定运行带来未知风险。在文献^[17]中,由于未考虑源荷不确定性的影响,实际场景中可能会出现负载率约束不满足的情况,从而导致供电单元划分结果的不可行。同时,考虑源荷不确定性将使模型变得复杂,并增加求解难度。模糊隶属度作为解决不确定性的有效方案,具有在信息不足时描述不确定性的优势,在电网调度运行^[18-19]、机组

组合^[20]领域得到广泛应用,但如何将其扩展到配电网供电单元划分方面还需进一步研究。

为此,本文建立综合考虑模糊机会约束的中压配电网供电单元划分模型,并提出相应的求解思路。首先,遵循先站间供电单元后站内供电单元的划分顺序,建立站间站内迭代的供电单元划分框架,考虑分布式电源出力和负荷的不确定性,采用模糊机会约束完成分布式电源出力和负荷参数的不确定性建模;其次,以供电单元数量最少和负荷均衡度最优为目标,建立综合考虑模糊机会约束的供电单元划分模型;再次,对约束条件中的模糊变量进行清晰等价处理,将不确定性变量转化为与置信水平相关的确定性变量;然后,进行站间供电单元划分,并以负荷同时率均值的期望最小为指标优选划分方案,以站间供电单元划分方案为基础,进行站内供电单元划分;最后,通过算例仿真,验证所提模型和方法的有效性与实用性。

1 供电单元划分框架及机会约束建模

1.1 供电单元划分总体框架

供电单元主要分为变电站内联络的供电单元和变电站之间联络的供电单元,因为站间供电单元划分在不同变电站的供电区域分别挖掘馈线供电能力,站内供电单元是基于相邻馈线组对同一座变电站的供电单位进行划分。2种供电单元在划分技术上存在差异,无法进行整体规划,因此需要顺序求解站内、站间供电单元划分模型。而由于变电站地理位置约束,如果先进行站内供电单元划分,变电站之间的负荷特性匹配区间减小,可能无法找到站间供电单元的可行解。

因此,供电单元的划分按照先站间后站内的顺序,构建站间站内迭代的供电单元划分框架,如图1所示,该框架包括站间供电单元划分、站间供电单元划分方案优选与站内供电单元划分。

首先,基于站间馈线负载率控制和站间联络位置,在每种负载率下生成多组不同站间联络位置的站间供电单元划分方案;其次,以站间供电单元负荷同时率均值最小为指标优选划分方案;再次,以优选的站间供电单元划分方案为基础,考虑站内联

络馈线负荷特性匹配划分站内供电单元;然后,改变站间馈线负载率,迭代进行上述供电单元划分,得到多组不同负载率下供电单元划分方案;最后,在满足数量最少的基础上,选出各供电单元内转供线路最大实际负载率最均衡的划分方案。

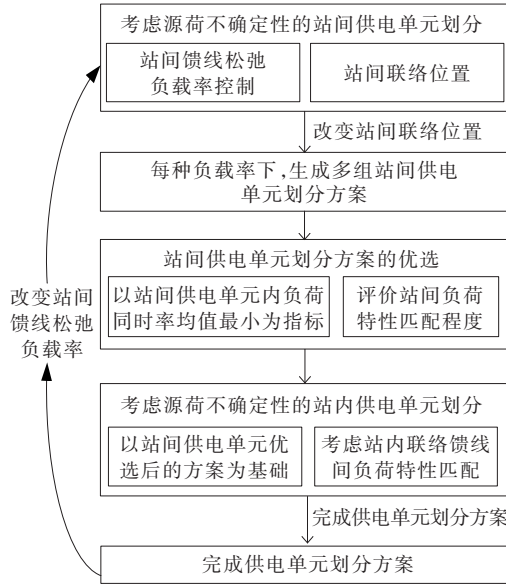


图1 站间站内迭代的供电单元划分框架

Figure 1 Power supply unit division framework for inter-station and intra-station iterations

1.2 不确定性参数建模

分布式电源出力和负荷的不确定性比较相似,均可以以样本数据为参考,在允许的比例范围内波动。为此,可以采用三角函数表示分布式电源出力和负荷的模糊参数^[18]建立不确定性模型。

$$\mu(P) = \begin{cases} \frac{P - P_1}{P_c - P_1}, & P_1 \leq P \leq P_c \\ \frac{P_2 - P}{P_2 - P_c}, & P_c \leq P \leq P_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mu(P)$ 为隶属度函数; P_1 、 P_2 为隶属度参数,决定隶属度函数形状,可由样本值 P_c 确定, $P_1 = \rho_1 P_c$, $P_2 = \rho_2 P_c$ 。其中, ρ_1 、 ρ_2 为比例系数,可由不确定性变量的历史数据确定。三角形模糊参数如图2所示。

所以,负荷三角形模糊参数由三元组^[19]表示为

$$\tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} = (\rho_1 P_{i,t}^{\text{load,fc}}, P_{i,t}^{\text{load,fc}}, \rho_2 P_{i,t}^{\text{load,fc}}) = P_{i,t}^{\text{load,fc}}(\rho_1, 1, \rho_2) \quad (2)$$

式中, $\tilde{P}_{i,t}^{\text{load}}$ 为第*i*个负荷在*t*时刻的大小,具有不确定性; ρ_1 、 ρ_2 为比例系数, $0 \leq \rho_1, \rho_2 \leq 1$,可由负荷的历史

数据确定; $P_{i,t}^{\text{load,fc}}$ 为第*i*个负荷在*t*时刻的样本值。

分布式电源出力的三角形模糊参数可由三元组表示:

$$\tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}} = (\sigma_1 P_{i,t}^{\text{dg,fc}}, P_{i,t}^{\text{dg,fc}}, \sigma_2 P_{i,t}^{\text{dg,fc}}) = P_{i,t}^{\text{dg,fc}}(\sigma_1, 1, \sigma_2) \quad (3)$$

式中, $\tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}}$ 为第*i*个分布式电源在*t*时刻出力的大小,具有不确定性; σ_1 、 σ_2 为比例系数, $0 \leq \sigma_1, \sigma_2 \leq 1$,可由分布式电源出力的历史数据确定; $P_{i,t}^{\text{dg,fc}}$ 为第*i*个分布式电源在*t*时刻出力的样本值。

不同类型分布式电源和负荷不确定性建模方法相同,但三角形隶属度参数不同,可根据历史数据差异化设置允许波动比例^[20]。

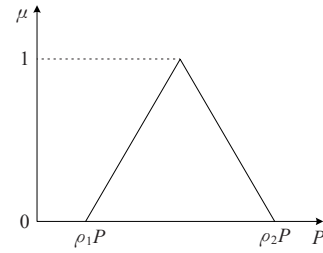


图2 三角形模糊参数

Figure 2 Triangular fuzzy parameters

2 供电单元划分模型

2.1 目标函数

为避免出现多组数量相同的供电单元划分方案无法选择的情况,以供电单元划分数最少和各供电单元内转供线路最大实际负载率最均衡为目标,建立多目标供电单元划分模型。考虑到分布式电源接入能够抵消源荷特性匹配的部分负荷,按照传统*N*-1准则设置线路最大负载率转供后可能留有供电裕度。为充分利用馈线供电能力,设置馈线最大负载率区间,具体见文3.2。为此,馈线最大负载率以集合形式存在。模型决策变量包括馈线最大负载率集合和负荷归属单元。目标1供电单元划分数与馈线最大负载率有关,可由变电站所供负荷量与馈线最大负载率的比值获得。将目标1作为边界条件迭代决策负荷所属单元情况,可计算得到目标2各供电单元内转供线路实际负载率最大值的方差。该模型目标函数如下:

$$\min Y \quad (4)$$

$$Y = kN_{\text{line}} \quad (5)$$

$$N_{\text{line}} = \sum_{r=1}^{N_{\text{sub}}} S_r / \mu_0 \quad (6)$$

$$\min \beta = \sum_{j=1}^Y (\gamma_{j\max} - \bar{\gamma})^2 / Y \quad (7)$$

$$\gamma_{j\max} = \max \frac{|\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}}|}{L_{\max} \cos \varphi} \quad (8)$$

$$\bar{\gamma} = \sum_{j=1}^Y \frac{|\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}}|}{L_{\max} \cos \varphi} \quad (9)$$

式中, Y 为全部供电单元个数; k 为供电单元划分数与变电站出线条数比值系数, 由供电单元接线模式决定, 单联络接线 k 取 0.5; N_{line} 为变电站出线条数; N_{sub} 为变电站数量; S_r 为第 r 个变电站净负荷总量; μ_0 为馈线最大负载率; $\bar{\gamma}$ 为各供电单元中供电单元内转供线路实际负载率最大值的均值; $\gamma_{j\max}$ 为第 j 个供电单元中转供线路最大实际负载率的最大值; β 为各供电单元内转供线路实际负载率最大值期望的方差, 以此描述各供电单元内转供线路实际负载率最大值间的均衡性; $N_{\text{cell}}^{\text{load}}$ 为待划分供电网格内负荷数量; $N_{\text{cell}}^{\text{dg}}$ 为待划分供电网格内分布式电源数量; $\cos \varphi$ 为功率因数; $L_{\max}$ 为线路传输容量的最大值; x_{jk} 为馈线 j 与供电单元 j 的归属状态变量, 如果馈线 j 属于供电单元 j , 则 $x_{jk}=1$, 反之为 0; x_{ik} 为负荷 i (含分布式电源) 与馈线 k 归属状态变量, 如果负荷 i 由馈线 k 供电, 则 $x_{ik}=1$, 反之为 0。

2.2 约束条件

1) 供电单元内故障后转供线路最大实际负载率约束。

供电单元内任意一条馈线故障, 非故障馈线对故障馈线进行转供后实际负载率任意时刻不能超过限制值, 采用模糊机会约束描述供电单元内故障后转供线路最大实际负载率约束。

$$P \left\{ \frac{|\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}}|}{L_{\max} \cos \varphi} \leq 100\% \right\} \geq \epsilon \quad (10)$$

式中, ϵ 为约束条件成立的置信水平, 对式(10)进行

变换可以得到:

$$P \left\{ \left| \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} x_{jk} \tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}} \right| \leq L_{\max} \cos \varphi \right\} \geq \epsilon \quad (11)$$

2) 正常运行时馈线最大负载率约束。

为充分挖掘馈线供电能力, 对馈线负载率约束设置负载率区间。馈线任意时刻的负载率不能超过限制值, 设置模糊机会约束描述馈线最大负载率约束如下:

$$P \left\{ \frac{|\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} \tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} \tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}}|}{L_{\max} \cos \varphi} \leq \mu_0 \right\} \geq \epsilon$$

$$\mu_0 \in [k_{\min}, k_{\max}] \quad (12)$$

式中, $k_{\min}$ 、 $k_{\max}$ 分别为馈线负载率的上下限; 对式(12)进行变换可以得到:

$$P \left\{ \left| \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} \tilde{P}_{i,t}^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} \tilde{P}_{i,t}^{\text{dg}} \right| \leq \mu_0 L_{\max} \cos \varphi \right\} \geq \epsilon, \mu_0 \in [k_{\min}, k_{\max}] \quad (13)$$

3 模型求解

因为考虑分布式电源出力 and 负荷的不确定性, 供电单元内故障后转供线路最大实际负载率约束和馈线最大负载率约束含有不确定性变量, 建立模糊机会约束模型, 直接求解比较困难。所以, 首先将模糊变量转化为清晰等价类, 再进行站间站迭代的供电单元划分模型求解。

3.1 模糊变量的处理

根据不确定性参数建模, 首先建立分布式电源出力和负荷的模型, 然后将供电单元划分模型约束条件式(11)、(13)中的模糊变量转化成清晰等价类^[20]。

$$(2 - 2\epsilon) \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} x_{jk} P_{i,t}^{\text{load, fc}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} x_{jk} P_{i,t}^{\text{dg, fc}} \right) +$$

$$(2\epsilon - 1) \left[\rho_2 \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} x_{jk} P_{i,t}^{\text{load, fc}} - \sigma_2 \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} x_{jk} \cdot \right.$$

$$\left. P_{i,t}^{\text{dg, fc}} \right] - L_{\max} \cos \varphi \leq 0 \quad (14)$$

$$(2 - 2\epsilon) \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} P_{i,t}^{\text{load, fc}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} P_{i,t}^{\text{dg, fc}} \right) + (2\epsilon -$$

$$1) \left[\rho_2 \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{load}}} x_{ik} P_{i,t}^{\text{load, fc}} - \sigma_2 \sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}^{\text{dg}}} x_{ik} P_{i,t}^{\text{dg, fc}} \right] -$$

$$\mu_0 L_{\max} \cos \varphi \leq 0, \mu_0 \in [k_{\min}, k_{\max}] \quad (15)$$

3.2 供电单元划分模型求解方法

经过上述模糊变量的处理,将模型转换为确定性模型,以便供电单元划分模型的求解。

首先以变电站为中心,在各个区域以角度均分的原则生成若干条中心线,站内区域每2条相邻的中心线互联形成一个站内供电单元,站间2条馈线互联形成一个站间供电单元。

1) 考虑分布式电源影响的站间供电单元划分。

设置站间馈线负载率区间 $[k_{\min}, k_{\max}]$, $k_{\min}$ 为不考虑分布式电源时按照 $N-1$ 准则站间馈线最大负载率值,如单联络接线模式时最大负载率为50%; $k_{\max}$ 为考虑分布式电源接入时抵消部分负荷后满足供电单元故障后转供线路最大实际负载率约束的最大负载率值。在不同预设的站间馈线负载率为 μ_0 , 负载率步长为 $\Delta\mu$, 令 $\mu_0 = k_{\min} + s\Delta\mu$, $s=1, 2, 3, \dots$, 按以下步骤进行站间供电单元供电范围划分。

① 基于不同初始馈线位置,以加权距离最小为原则,迭代决策分布式电源和负荷归属馈线,获得2座变电站站间供电单元划分结果。

将初始生成的馈线角度旋转一定角度 α ,直至旋转角度变化次数达到上限 $N_{\max}$,得到 $N_{\max}$ 组馈线初始角度。计算各负荷加权距离和加权因子,具体表达式如下:

$$d_{m,i} = d'_{m,i} \omega_1 \omega_2 \quad (16)$$

$$d_{n,j} = d'_{n,j} \omega_1 \omega_2 \quad (17)$$

$$\omega_1 = \left(\frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_{\max}} \right)^q \quad (18)$$

$$\omega_2 = \left(\frac{1}{24} \sum_i \sigma_i^2 \right)^q \quad (19)$$

式中,站间馈线 i 与 j 组成一个供电单元; $d'_{m,i}$ 、 $d_{m,i}$ 分别表示第 m 个负荷到馈线 i 的欧式距离和加权距离; $d'_{n,j}$ 、 $d_{n,j}$ 分别表示第 n 个负荷到馈线 j 的欧式距离和加权距离; ω_1 为加权因子,与该供电单元的峰谷差率有关; q 为加权因子的放大系数; $\eta_{\max}$ 、 $\eta_{\min}$ 分别为负荷点与光伏加入馈线 i 或馈线 j 后,该供电单元内的净负荷时序出力均值的最大值、最小值;当负荷点与光伏的加入有利于改善供电单元的峰谷差时,加权因子 ω_1 值会变小,加权距离也随之变小,增加负荷点属于该供电单元的可能性,进而保证供电单

元内源荷特性匹配; σ_i^2 为负荷点与光伏加入馈线 i 或馈线 j 后,供电单元内净负荷在第 t 时刻大小的方差,用来描述供电单元内净负荷大小的波动程度,当负荷点与光伏的加入会减小净负荷大小的方差时,说明该负荷的加入会减小净负荷大小的波动程度与不确定性,加权因子 ω_2 会减小,加权距离随之减小,有利于负荷点或光伏加入该供电单元。

基于不同馈线初始角度,各供电单元馈线带加权距离最小的负荷^[17],直至馈线的负载率不再小于预设负载率。将馈线按照过所带负荷地理位置中心这一原则进行角度更新,得到不同馈线初始角度下 $N_{\max}$ 组站间供电单元供电范围的划分方案。

计算不同预设负载率下2座变电站站间供电单元划分,最终得到多组站间供电单元划分方案。

② 评判站间供电单元划分方案性能,进行优选。

输出满足供电单元内故障后转供线路最大实际负载率约束的供电单元划分方案,并以各个站间供电单元内负荷同时率均值最小为指标,对站间供电单元划分方案进行优选。

2) 基于站间供电单元划分方案,迭代决策各个负荷点归属馈线^[17],进行站内供电单元划分。

3) 遍历所有可行方案,在供电单元数量最小的基础上,选择各供电单元内转供线路实际负载率最大值方差最小的划分方案。

4 算例分析

4.1 算例概况

实例中包括由3座 $2 \times 63 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 变电站形成的供电网格^[21],各负荷类型与位置信息如图3所示,10 kV主干线型号为LGG-185,馈线容量为7.8 MW,其中虚线为各变电站供电范围的边界,每座变电站均有30个负荷点接入了分布式光伏,深黑色节点表示配置了光伏的负荷点,各个光伏装机容量为0.25 MW。模糊机会约束置信度 ϵ 为0.95,光伏和负荷用三角模糊数表示,模糊隶属度参数取值见表1。以单联络接线模式^[22-23]为例划分供电单元,站间馈线负载率区间上限 $k_{\max}$ 为58%,下限 $k_{\min}$ 为50%,

负载率步长 $\Delta\mu$ 为 1%。光伏出力特性见文献[24], 如图4所示。

表1 隶属度参数

Table 1 Affiliation parameters

模糊参数	ρ_1/σ_1	1	ρ_2/σ_2
光伏出力	0.5	1	1.5
负荷	0.9	1	1.1

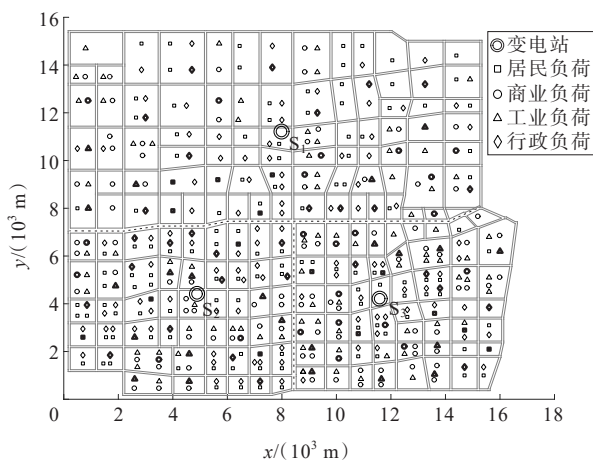


图3 实例地理信息

Figure 3 Example geographic information map

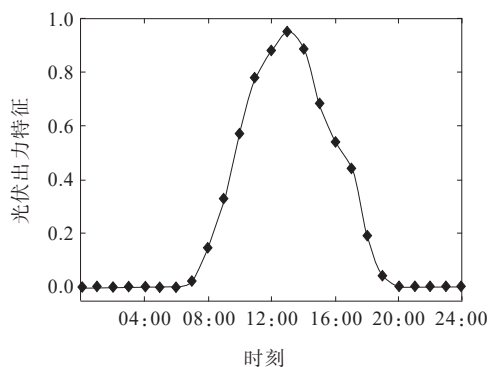


图4 光伏出力特性

Figure 4 Photovoltaic output characteristic

4.2 基于模糊机会约束的有源配电网供电单元划分结果分析

场景1 考虑分布式电源出力和负荷的不确定性,站间馈线负载率约束区间为[50%,58%],模糊机会约束置信水平为0.95。

供电单元划分结果如图5和表2所示。场景1供电单元划分方案为每座变电站各自形成6个站内供电单元,每2座变电站之间形成3个站间供电单元,3座变电站共出线条数为54条。

表2 场景1最优供电单元划分方案

Table 2 The optimal power supply unit division scheme for different scenarios

场景	是否考虑分布式电源不确定性	是否考虑分布式电源接入	供电单元数量/个
1	是	是	27

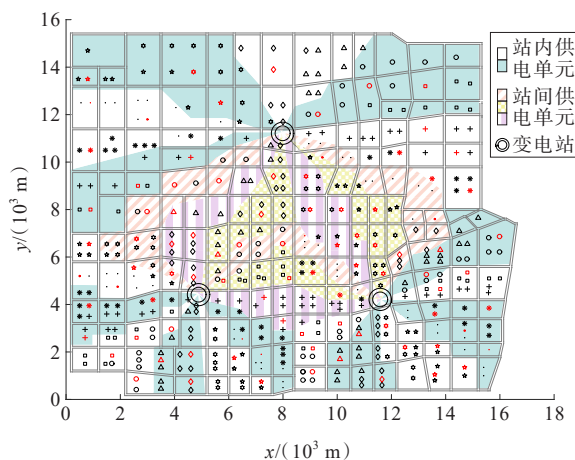


图5 场景1供电单元划分结果

Figure 5 Power supply unit division results in scenario 1

4.3 分布式电源接入对供电单元划分结果的影响分析

为了验证分布式电源接入对供电单元划分结果的具体影响作用,设置以下2种场景对划分方案进行比较分析,不考虑分布式电源接入。

场景2 不考虑分布式电源接入,设置负载率最大值为50%。

场景3 考虑分布式电源接入,但不考虑分布式电源出力和负荷的不确定性,站间馈线负载率约束区间为[50%,58%]。

2种场景的供电单元划分结果如图6~7和表3所示。

如图6所示,场景2供电单元划分方案为每座变电站各自形成6个站内供电单元,每2座变电站之间形成4个站间供电单元,3座变电站共出线条数为60条。

如图7所示,场景3供电单元划分方案为每座变电站各自形成5个站内供电单元,每2座变电站之间形成3个站间供电单元,3座变电站共出线条数为48条。

表3 场景2、3的最优供电单元划分方案

Table 3 The optimal power supply unit division scheme for different scenarios

场景	是否考虑分布式电源接入	供电单元数量/个
2	否	30
3	是	24

由表3可知,场景3与场景1对比,供电单元数量减小了6个,这是因为当分布式电源并网使净负荷数值减小,使馈线能带更多负荷,进而减少了变电站出线数量,最终使供电单元数量减少。

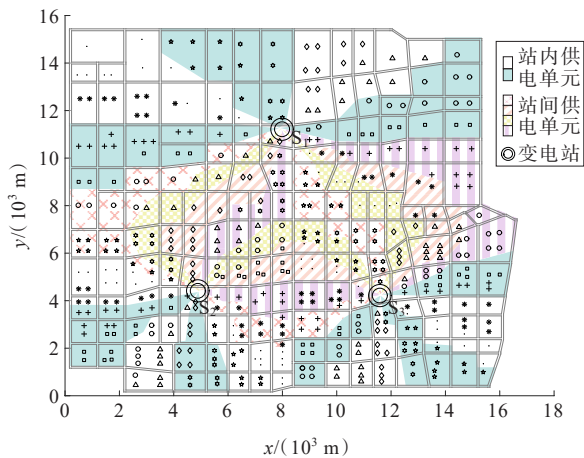


图6 场景2供电单元划分结果

Figure 6 Power supply unit division results in scenario 2

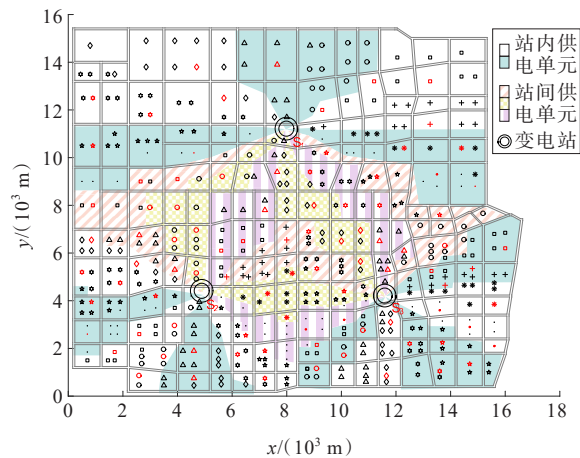


图7 场景3供电单元划分结果

Figure 7 Power supply unit division results in scenario 3

4.4 源荷不确定性及其置信度对供电单元划分结果的影响分析

为了验证分布式电源接入和考虑源荷不确定性及其置信度对供电单元划分结果的影响,设置场景4与场景1、3进行比较分析。

场景4 考虑分布式电源出力和负荷的不确定性,站间馈线负载率约束区间为 $[50\%, 58\%]$,模糊机会约束置信水平为0.75。

当供电单元内故障后转供线路最大实际负载率约束和正常运行时馈线负载率约束成立的置信水平取值不同时,得到的最优供电单元划分方案不同,表3展示了不同置信水平以及不考虑源荷不确定性对应的不同结果。

表4 不同置信水平对应的划分方案

Table 4 The division schemes corresponding to different confidence levels

场景	机会约束置信水平	供电单元数量/个
3	不考虑源荷不确定性	24
1	0.95	27
4	0.75	24

由表4可知,对比场景3和场景1可以看出,采用置信水平为95%的模糊机会约束得到的划分方案供电单元总数为27个,比场景3不考虑源荷不确定性的划分结果多3个,因为如果不考虑分布式电源出力和负荷的不确定性,直接对确定性问题求解,馈线容量比采用不确定规划中的馈线容量低,由此可见采用模糊机会约束得到的划分方案更加保守,变电站出线条数更多。

对比场景1和场景5可以看出,随着模糊机会约束置信水平的降低,划分的供电单元数量降低。因为,当置信水平较高时,意味着供电单元内故障后转供线路最大实际负载率约束和正常运行时馈线负载率约束成立的概率较大,约束条件较为严格,供电单元中每条馈线可供负荷较少,供电单元数量较多;与之相反,当机会置信水平较低时,意味着供电单元内故障后转供线路最大负载率约束和馈线负载率约束成立的概率较小,约束条件较为宽松,所以供电单元中每条馈线可供负荷较多,供电单元数量较少。然而,置信水平对供电单元数量具有阶跃性的影响,模糊机会约束的置信水平只有变化足够大时,供电单元数量才会发生变化。

5 结语

随着新型配电系统的发展,分布式电源高渗透

率入网,源荷不确定性对供电单元划分的影响越来越大。针对这一问题,建立了综合考虑模糊机会约束和负载率的中压配电网供电单元划分模型,提出了相应的求解思路,并设置算例验证模型的有效性,得出了以下结论:

1) 适当的分布式电源接入能够降低净负荷特性,减小变电站出线条数,从而为未来规划建设保留新增馈线间隔,提高配电网规划的灵活性;

2) 采用模糊机会约束对分布式电源出力和负荷的不确定性进行建模求解,能够有效避免出现未知风险,有利于配电网安全可靠供电。

本文划分方法研究主要以单联络接线模式下的供电单元为对象,没有涉及多联络等接线模式,也没有考虑电动汽车、储能等多元负荷大规模并网对划分结果的影响,下一步将对这些问题展开研究。

参考文献:

- [1] 迟福建,孙阔,张章,等. 网格化规划系统中电气计算核心算法的实现[J]. 发电技术,2022,43(6):860-868.
CHI Fujian, SUN Kuo, ZHANG Zhang, et al. Implementation of core algorithm of electrical calculation in grid planning system[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 860-868.
- [2] DL/T 5729—2016. 配电网规划设计技术导则[S].
DL/T 5729—2016. The guide for planning and design of distribution network[S].
- [3] 夏伟,蔡文婷,刘阳. 基于隐私同态的城市配电网多级网格数据聚合算法[J]. 电测与仪表,2022,59(9):111-118.
XIA Wei, CAI Wenting, LIU Yang. Multi-level grid data aggregation algorithm for urban distribution network based on privacy homomorphism[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 111-118.
- [4] 赵婧琦. 配电网供电分区划分方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
ZHAO Jingqi. Research on classification method of distribution network partition[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [5] 金国彬,刘玉龙,李国庆,等. 考虑可靠性的交直流混合配电网网架与分布式电源协同优化规划[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(22):59-70.
JIN Guobin, LIU Yulong, LI Guoqing, et al. Collaborative optimization planning of an AC/DC hybrid distribution network frame and distributed power generation considering reliability[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 59-70.
- [6] 赵龙,杨波,崔灿,等. 基于多种群牵引差分进化算法的含分布式电源配电网规划[J]. 供用电,2022,39(5):61-69.
ZHAO Long, YANG Bo, CUI Can, et al. Distribution network planning with distributed generation based on multi group traction differential evolution algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 61-69.
- [7] 王赛一,吴正骅,华月申,等. 基于网格化理念的配电网规划评价模型[J]. 广东电力,2016,29(7):49-52+58.
WANG Saiyi, WU Zhenghua, HUA Yueshen, et al. Evaluation model for power distribution network planning based on grid concept[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(7): 49-52+58.
- [8] 肖白,郭蓓,姜卓,等. 基于负荷点聚类分区的配电网网架规划方法[J]. 电力建设,2018,39(11):85-95.
XIAO Bai, GUO Bei, JIANG Zhuo, et al. Distribution network planning method based on clustering blocks of load nodes[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 85-95.
- [9] 李俊杰,邓嘉明,姜世公,等. 考虑用户差异化可靠性需求的配电网规划方法[J]. 电网与清洁能源,2021,37(5):74-82.
LI Junjie, DENG Jiaming, JIANG Shigong, et al. A distribution network optimization planning method based on differential reliability demand[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 74-82.
- [10] 陈超,李志铿,苏悦平. 基于空间聚类的中压配电网网格优化划分方法[J]. 四川电力技术,2017,40(4):20-23.
CHEN Chao, LI Zhikeng, SU Yueping. Optimal grid division method for medium-voltage distribution network based on spatial clustering[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(4): 20-23.
- [11] 赵一男,宋斌,钱振宇,等. 未来配电网的分布式形态及规划方法[J]. 中国电力,2022,55(4):70-77.
ZHAO Yinan, SONG Bin, QIAN Zhenyu, et al. Dispatching architecture and planning method of future distribution network[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 70-77.
- [12] 张漫,王主丁,李强,等. 中压目标网架规划中供电分区优化模型和方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):125-131.
ZHANG Man, WANG Zhuding, LI Qiang, et al. Optimization

- model and method of power supply area division for planning of medium-voltage target network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 125-131.
- [13] 姚福生, 杨江, 王天华. 中压配电网不同接线模式下的供电能力[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 93-95.
- YAO Fusheng, YANG Jiang, WANG Tianhua. Power supply capacity of mid-voltage distribution networks under different connection modes[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 93-95.
- [14] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于GIS空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 92-99.
- SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation life cycle cost planning based on the GIS spatial analysis and improved PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 92-99.
- [15] 谢伟, 王哲斐, 蔡秋烨, 等. 基于最优系统能效的配电网规划方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 128-134.
- XIE Wei, WANG Zhefei, CAI Qiuye, et al. Distribution network planning based on optimal system efficiency[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 128-134.
- [16] 陈哲, 王主丁, 黄河, 等. 中压配电网规划中计及多因素影响的供电分区划分方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4636-4643.
- CHEN Zhe, WANG Zhuding, HUANG He, et al. Power supply area division method with multiple factors' influence for medium voltage distribution network planning[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4636-4643.
- [17] 葛少云, 蔡期塬, 刘洪, 等. 考虑负荷特性互补及供电单元划分的中压配电网实用化自动布线[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 790-803.
- GE Shaoyun, CAI Qiyuan, LIU Hong, et al. Practical automatic planning for MV distribution network considering complementation of load characteristic and power supply unit partitioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 790-803.
- [18] 王颖杰, 詹红霞, 胡晓晖, 等. 考虑源荷不确定性的电热系统联合调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(4): 7-13+29.
- WANG Yingjie, ZHAN Hongxia, HU Xiaohui, et al. Combined dispatch of electricity and heat system considering the uncertainty of source and load[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 7-13+29.
- [19] 张祥宇, 舒一楠, 付媛. 基于虚拟储能的直流微电网源荷储多时间尺度能量优化与分区协调控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 6011-6024.
- ZHANG Xiangyu, SHU Yinan, FU Yuan. Multi-time-scale energy optimization and zone coordinated control of DC microgrid source-load-storage based on virtual energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6011-6024.
- [20] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44.
- XIONG Hu, XIANG Tiejue, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 36-44.
- [21] 解洋, 梅飞, 郑建勇, 等. 基于V-I轨迹颜色编码的非侵入式负荷识别方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 93-102.
- XIE Yang, MEI Fei, ZHENG Jianyong, et al. Non-intrusive load monitoring method based on V-I trajectory color coding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 93-102.
- [22] 何文涛. 中压配电系统供电模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- HE Wentao. Research on power supply model of medium voltage distribution system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [23] 程鹏, 葛少云, 刘洪. 基于三角形单联络供电模型的中压配电网智能规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 947-953.
- CHENG Peng, GE Shaoyun, LIU Hong. Intelligent planning of medium voltage distribution network based on triangle-shaped power supply model with single contact[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 947-953.
- [24] 季玉琦, 陈雪寒, 薛源, 等. 考虑“源—荷”时序特性的配电网电压无功分区[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 45-56.
- JI Yuqi, CHEN Xuehan, XUE Yuan, et al. Voltage and reactive power partitioning of distribution network considering the temporal information of “source-load” [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 45-56.