

## 基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供研究

周倩<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 易春磊<sup>1</sup>, 任小航<sup>1</sup>, 杨成涛<sup>1</sup>, 李培霞<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司瑞丽供电局, 云南 瑞丽 678600; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 由于配电网负荷波动性会给转供操作带来一定的风险, 因此在进行配电网负荷转供操作时, 通常会因忽略电网负荷的不确定性而导致转供效果不佳。对此, 提出基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供研究。采用相关性分析法, 从配电网历史负荷数据中筛选出对负荷不确定性影响较大的关键特征, 然后结合线性回归模型对负荷的期望值以及标准差进行预测, 实现负荷不确定性建模。结合 Distflow 潮流计算模型, 建立系统的状态方程。并通过迭代求解状态方程, 从而得到系统的潮流解。通过结合图论算法, 将电网拓扑结构表示为图的形式, 并结合路径上所有边的传输效率以及稳定性的平均值等参数对综合评估函数进行构建。并通过更新邻居节点的评估值, 对满足负荷转供容量需求的最优路径进行搜索。在实验中, 对提出的方法进行了转供效果的检验。最终的测试结果表明, 采用提出的方法对配电网负荷进行转供操作后, 电网负荷失电量较少, 具备较为理想的转供效果。

**关键词:** 配电网; 匹配潮流; 负荷转供; 潮流计算; 负荷失电量

中图分类号: TP273; TM933

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0178-05

## Research on online emergency transfer of distribution network load based on matching power flow

Zhou Qian<sup>1</sup>, Li Liang<sup>1</sup>, Yi Chunlei<sup>1</sup>, Ren Xiaohang<sup>1</sup>, Yang Chengtao<sup>1</sup>, Li Peixia<sup>2</sup>

(1. Ruili Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Ruili 678600, Yunnan, China;

2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, Shandong, China)

**Abstract:** Because the fluctuation of distribution network load will bring certain risks to the switching operation, when switching operation of distribution network load, the effect of switching operation is usually poor because the uncertainty of distribution network load is ignored. In this paper, the research on online emergency transfer of distribution network load based on matching power flow is proposed. By using correlation analysis method, the key features that have great influence on load uncertainty are selected from the historical load data of distribution network, and then the expected value and standard deviation of load are predicted by combining with linear regression model to realize load uncertainty modeling. Combined with Distflow power flow calculation model, the state equation of the system is established. By solving the state equation iteratively, the power flow solution of the system is obtained. By combining the graph theory algorithm, the power grid topology structure is expressed as a graph, and the comprehensive evaluation function is constructed by combining the transmission efficiency and the average value of stability of all edges on the path. By updating the evaluation values of neighboring nodes, the optimal path to meet the demand of load transfer capacity is searched. In the experiment, the effect of the proposed method is tested. The final test results show that, after the proposed method is used to switch power supply to the distribution network load, the power loss of the power grid load is less, which has an ideal switching effect.

**Keywords:** distribution network; match the trend; load transfer; power flow calculation; load power loss

在实际运行中, 配电网常因设备故障、自然灾害等原因导致部分区域停电, 对用户的正常生产生活造成严重影响。匹配潮流技术作为电力系统分析的重要工具, 通过模拟电力系统在不同运行条件下的潮流分布, 为电力系统的优化调度、故障恢复等提供决策支持<sup>[1]</sup>。在配电网负荷在线紧急转供研究中, 应用匹配潮流技术能够准确评估不同转供方案对配电网潮流分布的影响, 从而选择出最优的转供方案, 实现故障后的快速恢复供电。

近年来, 国内外学者在配电网负荷转供领域进行了大量的研究。例如, 文献[2]通过实时监测和辨识电网的拓扑运行状态, 识别出故障区域和可转供的负荷。随后, 利用图论算法搜索出最优的转供路径, 并通过调整相关开关状态实现负荷的转移。但该方法的局限性在于, 当电网拓扑结构复杂或故障发生时, 可能存在无法找到合适转供路径的情况, 导致部分负荷被切除, 增加了停电损失。文献[3]通过准确的负荷预测, 可以提前制定负荷转供计划,

收稿日期: 2024-11-13; 录用日期: 2025-01-21

基金项目: 中国南方电网科技项目(080016KK52210002)

作者简介: 周倩(1988—), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 调度控制、电网稳定分析及继电保护。

引用本文: 周倩, 李亮, 易春磊, 等. 基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供研究[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6): 178-182. (Zhou Qian, Li Liang, Yi Chunlei, et al. Research on online emergency transfer of distribution network load based on matching power flow[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 178-182.)

减少因负荷波动导致的转供失败。但是当负荷预测模型不准确时,可能导致预测的负荷与实际负荷存在较大偏差,进而影响负荷转供的效果。文献[4]通过仿真分析,模拟了主配电网在故障情况下的负荷转供过程,并评估了不同转供方案的效果。然而,该方法在实际应用中可能受到仿真精度的限制,无法完全反映真实电网的复杂性和动态性。因此,在紧急情况下,该方法可能导致负荷转供方案不够优化,进而增加网络网损。文献[5]通过优化源荷储的协调运行,提高了配电网的弹性和可靠性。然而,在负荷转供的具体实现上,该文献主要关注于优化模型的构建和求解方法,而较少涉及时时性的考虑。在紧急情况下,如果负荷转供方法的实时性不足,可能导致无法及时响应故障,从而增加负荷切除量。此外,该方法在评估转供方案时可能未充分考虑网络损耗的影响,导致在某些情况下网络网损增加。

本文通过对电网负荷不确定性进行建模,有效平衡了负荷波动性对转供操作带来的不确定风险,在此基础上结合潮流分布预测,对满足负荷转供容量需求的最优路径进行搜索。

## 1 配电网负荷在线紧急转供

### 1.1 配电网负荷不确定性建模

由于在进行负荷转供时,需要考虑到不同负荷点之间的电量平衡和电网的稳定性,同时负荷波动性也会给电网转供带来一定的风险,因此进行配电网负荷在线紧急转供时,本文首先结合综合统计法,结合提取的关键特征以及选择的概率分布,建立负荷不确定性的数学模型。

首先收集配电网的历史负荷数据,包括不同时间尺度的负荷数据。然后本文结合统计学方法中的相关性分析,对特征进行选择,从而筛选出对负荷不确定性影响较大的关键特征<sup>[6]</sup>。对于负荷不确定性 $Y$ ,和特征变量 $X_i$ ,其中 $i$ 代表第 $i$ 个特征,通过计算这二者的皮尔逊相关系数 $\rho(X_i, Y)$ ,可以筛选出强关联负荷特征。具体计算公式如下所示。

$$\rho(X_i, Y) = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu_{x_i})(y_j - \mu_Y)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu_{x_i})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j - \mu_Y)^2}} \quad (1)$$

其中, $x_j$ 和 $y_j$ 分别代表第 $j$ 个数据点的特征值和负荷不确定性值, $\mu_{x_i}$ 和 $\mu_Y$ 分别代表特征和负荷不确定性的均值, $n$ 代表数据点总量。通过对上述计算出的 $\rho(X_i, Y)$ 设定一个筛选阈值,将相关性系数大于该阈值的特征视为关键特征<sup>[7]</sup>。然后本文与正态分布函数对负荷不确定性进行描述,其概率密度函数表达式如下所示。

$$f(P_L | \mu_p, \sigma_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (2)$$

其中, $\mu_p$ 代表配电网电力负荷的期望均值, $\sigma_p$ 代表负荷标准差,这两个值可以通过历史数据的统计分析得到, $P_L$

代表负荷的随机变量。利用提取的关键特征和选择的概率分布,建立负荷不确定性的数学模型<sup>[8]</sup>。本文结合线性回归模型来对 $\mu_p$ 和 $\sigma_p$ 的值进行预测,假设 $X$ 代表关键特征, $\beta_\mu$ 和 $\beta_\sigma$ 分别代表两个回归模型的系数,则负荷的期望值和标准差可以表示为

$$\begin{cases} \mu_p = X \cdot \beta_\mu \\ \sigma_p = \exp(X \cdot \beta_\sigma) \end{cases} \quad (3)$$

在上述建模过程中,本文对 $\sigma_p$ 使用了指数函数,以确保其始终为正数。

通过上述步骤即可完成对于配电网负荷不确定性的建模处理。首先采用相关性分析法,从配电网历史负荷数据中筛选出对负荷不确定性影响较大的关键特征,然后结合线性回归模型对负荷的期望值以及标准差进行预测<sup>[9]</sup>。

### 1.2 潮流分布的匹配潮流计算

考虑到负荷转供过程可能会改变电网中的潮流分布,因此为确保电网在转供过程中保持稳定,在完成负荷不确定性建模后,本文结合匹配潮流计算,对转供后的电网潮流分布进行预测,以此可以对后续转供路径选取提供帮助。

结合 Distflow 潮流计算模型,建立系统的状态方程。并通过迭代求解状态方程,从而得到系统的潮流解,包括各节点的电压、支路功率等<sup>[10]</sup>。假设 $P_j$ 表示配电网节点 $j$ 的有功功率, $Q_j$ 表示分别代表配电网节点 $j$ 的无功功率, $V_i$ 代表节点额定电压值,则 Distflow 算法下状态方程如下。

$$\begin{cases} P_i = P_j + r_{ij} I_{ij}^2 + P_{ij} \\ Q_i = Q_j + x_{ij} I_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \\ V_i^2 = V_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $P_i$ 表示配电网节点 $i$ 的有功功率, $Q_i$ 表分别代表配电网节点 $i$ 的无功功率; $P_{ij}$ 和 $Q_{ij}$ 分别代表从节点 $i$ 流向节点 $j$ 的支路有功功率以及无功功率; $r_{ij}$ 代表支路的电阻, $x_{ij}$ 代表支路电抗, $I_{ij}$ 代表支路流通的电流幅值<sup>[11]</sup>。上述方程组描述了配电网中潮流的分布情况,假设对于 Distflow 算法, $\Delta P_i$ 为有功功率不平衡量, $\Delta Q_i$ 为无功功率不平衡量, $\Delta V_i$ 为电压不平衡量,那么将该值加到当前的电压 $V_i^{\text{old}}$ 、有功功率值 $P_i^{\text{old}}$ 以及无功功率值 $Q_i^{\text{old}}$ 上,得到新的电压和功率估计值,具体计算公式如下所示。

$$\begin{cases} P_i^{\text{new}} = P_i^{\text{old}} + \Delta P_i \\ Q_i^{\text{new}} = Q_i^{\text{old}} + \Delta Q_i \\ V_i^{\text{new}} = V_i^{\text{old}} + \Delta V_i \end{cases} \quad (5)$$

其中, $V_i^{\text{new}}$ 、 $P_i^{\text{new}}$ 、 $Q_i^{\text{new}}$ 分别代表电压以及有功/无功功率的估计结果。将上述潮流解进行组合,即可完成对于配电网潮流分布预测。

### 1.3 负荷转供路径搜索

在完成潮流分布预测后,本文根据电网的实时运行情况 and 负荷预测结果,确定需要转移的负荷量和目标区域,并结合图论算法对负荷转供路径进行搜索<sup>[12]</sup>。

将电网表示为图 $G=(V,E)$ ,其中 $V$ 是节点集合(代表电网中的变电站、发电机、负荷等), $E$ 是边集合(代表电

网中的输电线路)。每条边 ( $e \in P$ ) 都有一个容量限制  $w_c(e)$ , 表示该输电线路的最大传输能力<sup>[13]</sup>。为了综合考虑多个因素, 本文选择定义一个综合评估函数  $F(P)$ , 其中,  $P$  代表配电网中的一条路径。假设  $b$  代表路径中的边数,  $w_l(e)$  代表边的传输效率,  $w_s(e)$  代表边的稳定性,  $w_l(e)$  代表边需要传输的负荷量, 则综合评估函数表达式如下所示。

$$F(P) = \alpha \cdot \left( \frac{\sum_{e \in P} w_l(e)}{b} - \beta \cdot \left( \frac{\sum_{e \in P} w_s(e)}{b} \right) - \gamma \cdot \max_{e \in P} \left( \frac{w_l(e)}{w_c(e)} \right) \right) \quad (6)$$

其中,  $\alpha$  代表传输效率权重因子,  $\beta$  代表边稳定性权重因子,  $\gamma$  代表负荷不确定性权重因子, 3 个权重因子主要用于平衡不同因素的重要性,  $\gamma$  的值主要根据上文中负荷不确定性建模结果进行拟定。

上述综合评估函数的构建过程中, 本文使用了路径上所有边的传输效率和稳定性的平均值, 以及路径上负荷与容量比的最大值。以此可以确保路径在整体上具有较高的传输效率和稳定性, 同时避免任何一条边过载。然后本文使用数组  $eval[]$  来记录从源点到每个节点的综合评估值。从未访问的节点中选择  $eval[]$  值最小的节点  $u$  作为当前节点。对于节点  $u$  的每个邻居节点  $v$ , 计算通过  $u$  到达  $v$  的路径的综合评估增量  $\Delta F(u, v)$ , 具体计算公式如下所示。

$$\Delta F(u, v) = F(u, v) - F(u) \quad (7)$$

其中,  $F(u, v)$  代表从  $u$  到  $v$  的直接边的综合评估值,  $F(u)$  代表节点  $u$  的当前综合评估值。如果通过  $u$  到达  $v$  的路径综合评估值  $eval[]$  低于  $v$  当前的  $eval[]$  值, 并且路径上所有边的容量均满足负荷转供的容量需求, 则对  $v$  的  $eval[]$  值进行更新, 并将节点  $u$  添加到已访问节点集合中<sup>[14]</sup>。重复以上步骤, 直到所有节点都被访问, 或者找到了满足负荷转供容量需求的最优路径, 即可完成负荷在线紧急转供处理。同时, 通过使用潮流分布预测结果, 可以预先计算出各条路径上的潮流分布和负荷情况。在搜索过程中, 可以实时检查路径上的容量是否满足负荷转供的需求, 从而避免选择那些容量不足的路径。

通过上述步骤即可完成对于负荷转供路径的搜索。通过结合图论算法, 将电网拓扑结构表示为图的形式, 并结合路径上所有边的传输效率以及稳定性的平均值等参数对综合评估函数进行构建。并通过更新邻居节点的评估值, 对满足负荷转供容量需求的最优路径进行搜索。将本节内容与上述提到的负荷不确定性建模以及潮流分布预测等相关内容进行结合, 至此, 基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供方法设计完成<sup>[15]</sup>。

## 2 实验论证

为了证明本文提出的基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供方法在实际转供效果方面优于常规的配电网负荷

在线紧急转供方法, 在完成算法方面的设计后, 通过构建实验对比环节, 对本文方法的实际转供效果进行检验。

### 2.1 实验说明

为验证本文提出的基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供方法在实际部署效果方面的优越性, 本次实验选取了两组常规的配电网负荷在线紧急转供方法作为对比对象, 分别为基于拓扑状态辨识的配电网负荷在线紧急转供方法, 以及基于负荷预测的配电网负荷在线紧急转供方法。通过构建实验平台, 采用 3 种转供方法对同一个配电网仿真模型进行负荷转供, 对比不同方法下的实际转供效果。

### 2.2 实验对象

本次实验所选取的配电网采用了典型的辐射状网络结构, 以变电站为中心, 通过馈线将电能输送到各个负荷节点。网络结构包含主干馈线、分支馈线以及多个末端负荷节点。主干馈线从变电站引出, 沿途通过多个分支馈线与末端负荷节点相连, 形成 1 个多分支的配电网。末端负荷节点数量为 100 个, 每个节点的平均负荷容量为 1 MVA, 分段开关和联络开关的额定电流均为 630 A, 动作时间约为 50 ms。针对上述选取的配电网, 本文结合 MATLAB 仿真软件, 通过对电网实际参数进行调取, 从而搭建出仿真配电系统, 具体拓扑结构如下图所示。

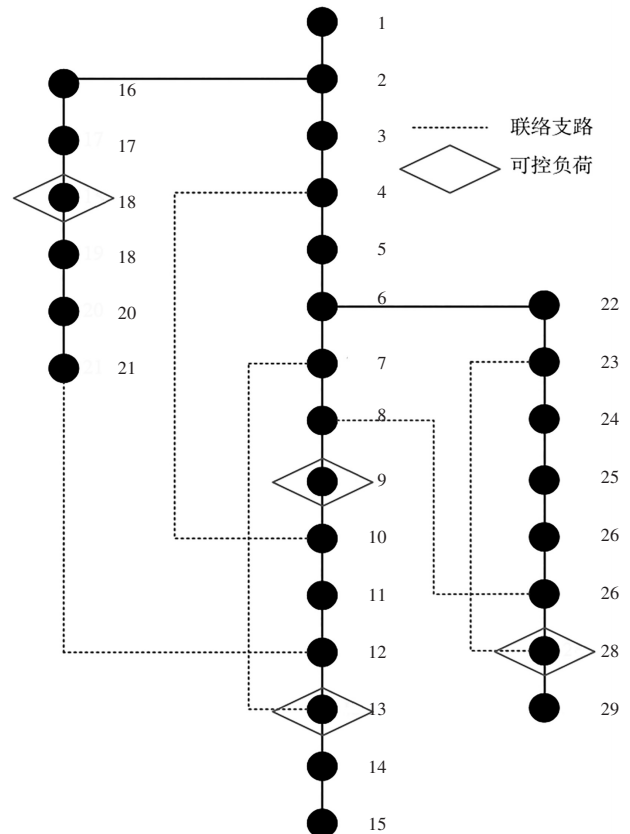


图1 仿真配电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of simulated distribution system

本文从实验选取的配电网对象中收集历史故障数据和负荷数据, 用于模拟紧急转供场景。由此本文从实验数据集选取出了部分紧急转供数据, 并结合仿真软件构建出的部分模拟转供场景信息如表 1 所示。

表 1 模拟转供场景信息

Tab. 1 Simulated transfer scenario information

场景编号	故障类型	故障发生位置	故障持续时间/s	负荷分布情况
1	单相接地故障	主干馈线 A, 第 3 km 处	3	高峰负荷, 均匀分布
2	相间短路故障	分支馈线 B1, 末端	2	平峰负荷, 集中于某几个节点
3	单相接地故障	分支馈线 C2, 中段	4	低谷负荷, 大部分节点负荷较低
4	相间短路故障	主干馈线 D, 起始段	1	高峰负荷, 部分节点负荷异常高
5	单相接地故障	分支馈线 E3, 起始段	5	平峰负荷, 某区域负荷集中
6	瞬时故障(自动恢复)	主干馈线 F, 第 2km 处	0.5	低谷时段
7	相间短路故障	分支馈线 G4, 中段	3.5	高峰时段

针对上述模拟出的转供场景, 本文分别采用三种方法进行紧急转供响应操作。对此, 本文设定相关性系数  $\rho(X_i, Y)$  筛选阈值为 0.75, 综合评估函数的三个权重因子分别为 0.15、0.45、0.25。待转供操作完成后, 对不同转供操作下的配电网性能参数进行记录, 从而实现实验对比分析。

2.3 转供效果对比

本文方法所得到的配电网负荷转供方案如表 2 所示。

通过上述实验结果可以看出, 本文提出的方法能够有效针对模拟出的不同转供场景进行负荷转供处理, 根据不同的故障类型以及负荷分布情况, 合理地选择转供路径和分配转供容量。为提高实验结果的可靠性, 本次实验以不同转供方案下的配电网负荷失电量作为对比指标, 对方法的实际转供效果进行衡量。该值越低, 代表转供方法越有

效, 能够在短时间内将负荷转移到其他馈线或电源。具体实验对比结果如图 2 所示。

表 2 不同转供场景下的负荷转供方案

Tab. 2 Load transfer schemes under different transfer

场景编号	转供路径	转供容量/MVA	转供时间/s
1	馈线 A→联络开关 K1→馈线 B	2.5	32
2	馈线 B1→分段开关 L2→主干馈线	1.8	45
3	馈线 C2→联络开关 M3→馈线 D	2.11	38
4	馈线 D→分段开关 N1→馈线 E	3.0	46
5	馈线 E3→联络开关 O2→馈线 F	2.0	35

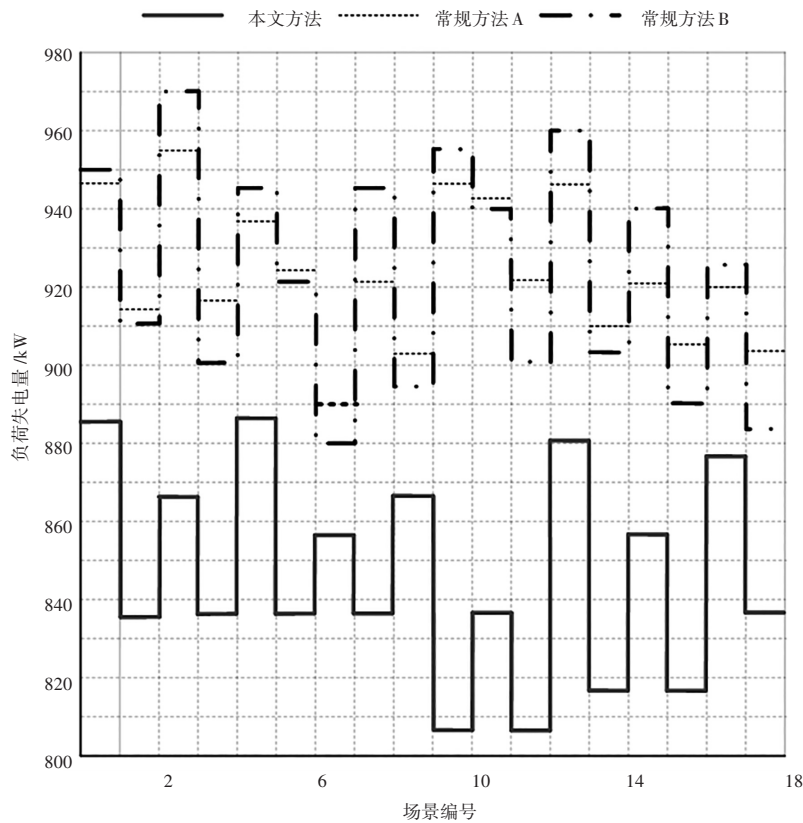


图 2 不同方法下的负荷失电量对比结果

Fig. 2 Comparison results of load loss under different methods

通过上述实验结果可以看出,在针对不同的转供场景进行负荷转供处理时,方法的实际转供效果也有所不同。通过数值上的对比可以明显看出,本文提出的基于匹配潮流的配电网负荷在线紧急转供方法在实际转供效果上明显优于两种常规的转供方法。

### 3 结论

本研究为配电网故障恢复领域提供了新的研究视角和思路,丰富了配电网优化调度的理论体系。通过将匹配潮流技术应用于负荷转供过程中,能够更准确地模拟和分析配电网在不同转供方案下的潮流分布,为制定最优的转供策略提供了科学依据。

### 参考文献

- [1] 马占业,李现伟,杜云朋,等. 基于预测的智能配电网负荷转供策略生成方法[J]. 电工技术, 2024(6): 111-113.
- [2] 付俊强,吴磊. 基于拓扑运行状态辨识的负荷转供技术[J]. 农村电气化, 2024(4): 1-5.
- [3] Lv L, Wu Z, Zhang J, et al. A VMD and LSTM based hybrid model of load forecasting for power grid security[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(9): 6474-6482.
- [4] 杨志淳,沈煜,杨帆,等. 基于电力 CPS 联合仿真的主配一体化电

(上接第 106 页)

息数据,让设计人员快捷地进行设计,极大程度上提高设计效率。平台可以精确地评估复杂地理环境中数字化信息然后进行三维场景建模,接着将三维场景转化为易于计算的加权栅格矩阵形式。然后引入数据挖掘中的  $Q$  值算法, $Q$  值算法基于历史数据和当前状态智能地规划输电线路最佳设计路线。此外,对设计好的路线,可以一键式自动统计所需设备材料,准确率均在 98% 以上。但是研究构建的平台精确度十分依赖采集数据的精确度,后期研究会重点研究。

### 参考文献

- [1] 章立,王峰,殷洪海. 基于视觉识别的输电线路状态监测系统[J]. 自动化仪表, 2022, 43(8): 94-98.
- [2] 孙大军,张照辉,赵科,等. 基于小波变换协同深度信念网络的输电线路故障识别与定位[J]. 制造业自动化, 2024, 46(2): 13-18.
- [3] 刘彪,魏朝志,王晓燕,等. 输电线路工程 EPC 项目塔基可视化查询平台设计[J]. 电力大数据, 2024, 27(12): 91-100.
- [4] 丁磊,刘晔. 基于激光雷达与 LiEarth 平台的输电线路三维可视化方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 135-138.
- [5] Yang D, He T, Zhang Z S. Transmission Line Planning Based on Artificial Intelligence in Smart Cities[J]. Mobile Information Systems,

- 网负荷转供方法研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 530-537.
- [5] 李庆生,李震,孙斌,等. 考虑源荷储协调的高弹性配电网最优负荷转供方法[J]. 中国测试, 2023, 49(10): 64-70.
- [6] 吕超,费平. 电网负荷转供装置转供模式与当值策略实施研究[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(5): 407-410,416.
- [7] 李吉峰,潘峰,王延勃,等. 考虑联络线负荷匹配特性的供电分区深度迁移学习负荷预测[J]. 电气应用, 2023, 42(9): 24-32.
- [8] 葛鑫,马仲坤,戚星宇. 机器学习在低压配电网负荷转供优化模型中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(9): 307-309.
- [9] 刘小康,张菁,张延迟. 基于改进层次-权法的含 PVES 配电网负荷转供优化模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(8): 55-63,72.
- [10] 曾宇,刘友波,高红均,等. 基于模型预测控制的高压配电网负荷转供与储能电站协同运行[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1902-1911.
- [11] 叶健民,王若愚,王天华,等. 各类预想事故情况下 500kV 终端站和枢纽站转供负荷能力定量对比[J]. 电工技术, 2022(13): 53-57.
- [12] 郑钢,胡炯,洪宇凯,等. 全维度主配网协同优化系统在电力负荷转供技术中的应用[J]. 中国高新科技, 2022(4): 54-55.
- [13] 冉秀敏,韩玺江,窦桑,等. 基于变分模态分解联合注意力机制的电力负荷预测[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11): 57-60.
- [14] 岳陈熙,徐庆峰. 110 kV 变压器增容改造中的负荷转供策略[J]. 电工技术, 2021(17): 89-91.
- [15] 曹茜,于志勇,荆世博,等. 改进和声搜索算法的配电网智能规划研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7): 79-83.

- 2022(8): 1-8
- [6] 周凯. 基于射频技术的室内三维定位技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 279-286.
- [7] 叶娜,严昱欣,张翔,等. 基于 BIM+Cesium 三维可视化校园系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 140-145.
- [8] 张志劲,周天宇,蒋兴良,等. 典型覆冰形状下输电线路风荷载影响研究[J]. 电网技术, 2023(12): 5247-5255.
- [9] 张焕龙,齐企业,张杰,等. 基于改进 YOLOv5 的输电线路鸟巢检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 151-159.
- [10] 穆利智,李泽文,吕佳佳,等. 结合 EMD-WVD 和布谷鸟搜索算法的输电线路故障暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 137-144.
- [11] 郭玮,张铁刚,林清,等. 基于三维建模的数字化机房运维数据可视化系统[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(6): 105-107.
- [12] 赵锐,王云杰,李杰,等. 基于激光雷达信号的直流输电线路故障测距研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5): 121-125.
- [13] 熊君伟,王统,贺广零. 基于改进的遗传算法优化 BP 神经网络输电线路山火预估模型的研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 1(7): 79-83.
- [14] 李仕林,方程,赵明,等. 基于动态风险评估的输电线路巡检计划优化研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 119-124.
- [15] 王龙宝,栾茵琪,徐亮,等. 基于动态簇粒子群优化的无人机集群路径规划方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(12): 3816-3823.