基于深度优先遍历的配电网扩容规划与业扩报装决策模型

马彦博

（国网山西省电力有限公司壶关县供电分公司，山西 长治 047300）

摘　要：针对配电网馈线负载不均衡、节点电压偏差较大的问题，设计了基于深度优先遍历的配电网扩容规划与业扩报装决策模型。利用深度优先遍历算法分析馈线拓扑结构与节点负荷分布，在此基础上完成馈线分区容量计算，并结合多指标评价确定扩容优先级；进一步构建兼顾经济性、运行安全性和用户用电满意度的多目标决策模型，对业扩负荷接入节点及接入容量进行优化。实验结果表明，应用该模型后，节点电压平均偏差为 1.2%，馈线负载率波动幅度为 10.9%，均优于对比方法，能够有效改善节点电压偏差和馈线负载不均衡问题，提高配电网扩容规划与业扩报装决策的合理性。

关键词：配电网；深度优先；扩容规划；业扩报装；电压偏差；负载均衡

中图分类号：TM715　　**文献标识码：**A

Research on distribution network expansion planning and business expansion application decision model based on depth-first traversal

MA Yanbo

（Huguan County Power Supply Branch，State Grid Shanxi Electric Power Co.，Ltd.，Changzhi，Shanxi 047300，China）

Abstract：To address uneven feeder loading and large node voltage deviations in distribution networks，a distribution network expansion planning and business expansion application decision model based on depth-first traversal is designed. The depth-first traversal algorithm is used to analyze feeder topology and node load distribution，based on which feeder partition capacity is calculated and expansion priority is determined through multi-index evaluation. A multi-objective decision model considering economy，operational safety and user electricity satisfaction is further constructed to optimize access nodes and access capacity for business expansion loads. Experimental results show that，after applying the model，average node voltage deviation is 1.2% and feeder load rate fluctuation is 10.9%，both outperforming comparison methods. The model can effectively reduce node voltage deviation and feeder load imbalance and improve rationality of distribution network expansion planning and business expansion application decisions.

Key words：distribution network，depth-first traversal，expansion planning，business expansion application，voltage deviation，load balancing

1　引言

配电网是连接电力系统与终端用户的重要环节，其运行状态直接影响供电可靠性和电能质量。随着区域负荷持续增长以及业扩报装需求增加，不同馈线和节点之间的负荷分布差异逐渐增大，部分区域容易出现馈线负载不均衡、节点电压偏差较大等问题，给配电网扩容规划和新增负荷接入带来较大压力。传统方法多依据既有负荷水平或局部运行指标进行扩容与接入决策，对馈线拓扑关系、容量状态及新增负荷影响的综合考虑不足，容易出现扩容顺序与实际需求不匹配、负荷接入后局部运行状态恶化等问题[1-2]。

针对上述问题，本文提出基于深度优先遍历的配电网扩容规划与业扩报装决策模型。通过对馈线拓扑及运行状态进行分析，建立扩容规划与业扩报装之间的关联关系，并结合容量约束、运行安全性、经济性及用户用电需求开展综合决策，以改善馈线负载分布和节点电压水平，提高扩容规划与业扩报装决策的合理性。

2　基于深度优先遍历的配电网扩容规划方法

2.1　基于深度优先遍历的馈线分区容量计算

为确定配电网中需要优先扩容的区域，首先利用深度优先遍历算法对馈线网络进行拓扑搜索。以变电站出线节点为起点，按照节点连接关系依次访问各级支路，并记录节点所属馈线、上下游连接关系及对应负荷信息，由此划分馈线分区。遍历过程如图 1 所示。

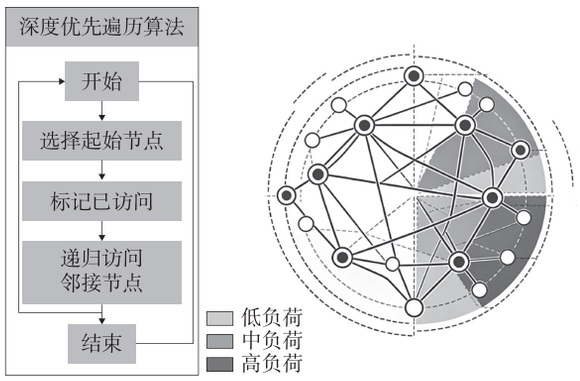

图1 配电网馈线拓扑深度优先遍历

划分完馈线分区后，需进一步评估各分区的可承载能力。馈线传输容量主要受额定电压及线路允许载流量限制，因此第i个馈线分区的额定传输容量可表示为：

$$S_i=\sqrt{3}\,U_N\cdot I_{\max} \tag{1}$$

式中，S_i为第i个馈线分区的额定传输容量；U_N为配电网额定电压；$I_{\max}$为该馈线分区允许通过的最大电流。

为进一步判断当前运行状态是否接近容量边界，需要按照馈线归属汇总深度优先遍历得到的节点负荷，并计算各分区实际负荷与额定容量之间的比例关系[3]。第i个馈线分区的负荷承载率可表示为：

$$\eta_i=\frac{S_{\text{load},i}}{S_i}\times 100\% \tag{2}$$

式中，η_i为第i个馈线分区的负荷承载率；$S_{\text{load},i}$为该馈线分区的实际负荷功率。当η_i较低时，说明该分区仍具有一定容量裕度；随着η_i增大，分区剩余供电能力逐步减小。当η_i达到预设阈值时，应将该分区纳入扩容评估范围。通过对应拓扑遍历结果、节点负荷数据与馈线容量参数，可形成各馈线分区的容量状态，为后续扩容优先级分析奠定基础。

2.2 扩容优先级确定

除了负荷承载率，不同馈线分区的扩容需求还受到节点电压偏差、容量裕度及负荷增长水平等因素影响。若仅依据单一指标确定扩容顺序，易使评价结果片面化。因此，需进一步构建多指标扩容优先级评价体系，以综合衡量各分区运行状态[4-5]。

对于负荷承载率、电压偏差等取值越大、扩容需求越高的指标，其标准化表达式为：

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{3}$$

式中，x'_{ij}为第i个馈线分区第j个评价指标的标准化值；x_{ij}为对应指标原始值；$\max(x_j)$和$\min(x_j)$分别为第i个馈线分区在所有馈线分区中的最小值与最大值。

对于容量裕度等取值越小、扩容需求越高的指标，则采用反向标准化处理：

$$x'_{ij}=\frac{x_{j,\max}-x_{ij}}{x_{j,\max}-x_{j,\min}} \tag{4}$$

经过标准化处理后，各指标均转换为0~1范围内的无量纲值，且标准化值越大，表示对应馈线分区的扩容需求越高，从而便于后续进行综合评价。

根据各指标对扩容需求的影响程度设置相应权重，并采用加权求和方式计算各馈线分区的扩容优先级综合得分：

$$P_i=\sum_{j=1}^{n}w_j x'_{ij} \tag{5}$$

式中，P_i为第i个馈线分区的扩容优先级综合得分；w_j为第j个评价指标的权重；n为评价指标的总数。

综合得分越高，说明该馈线分区在负荷水平、电压状态或容量裕度等方面越接近运行约束边界，相应扩容需求越高。根据各分区综合得分由高到低确定扩容顺序，并结合深度优先遍历得到的拓扑位置及上下游关系，对位于同一供电路径上的高优先级分区进行进一步分析。若多个分区同时接近容量上限，则还需结合其上游馈线容量和下游负荷分布确定扩容位置，避免局部扩容后仍存在传输瓶颈。

通过上述过程，可形成由拓扑识别、容量评估和优先级判定构成的扩容规划结果。该结果既可用于确定需要优先改造的馈线分区，也可为后续业扩报装决策中的候选接入区域筛选和容量约束设置提供依据，使扩容规划与新增负荷接入之间形成连续的决策关系。

3 配电网业扩报装决策模型

3.1 多目标决策模型构建

结合扩容规划结果以及配电网运行数据，进一步确定业扩报装过程中的负荷接入方案。考虑不同接入方案在投资成本、运行安全性和用户用电需求方面存在差异，本文从经济性、运行安全性和用户用电满意度3个方面构建多目标决策模型，并设置相应约束条件，以保证决策结果满足配电网实际运行要求[6]。

首先构建经济性目标函数，对业扩报装过程中涉及的设备购置与安装、运行维护以及功率损耗等成本进行综合计算：

$$\min F_1=C_{\text{eq}}+C_{\text{op}}+C_{\text{loss}} \tag{6}$$

式中，F_1为业扩报装总投资成本；C_{eq}为业扩报装配套设备的购置与安装成本；C_{op}为业扩报装后的设备运行维护成本；C_{loss}为负荷接入后配电网的功率损耗成本。

除了投资成本，新增负荷接入后还可能引起节点电压和设备负载水平变化，因此需进一步评价接入方案对配电网运行状态的影响。将节点电压偏差和设备负载率作为安全性评价指标，构建运行安全目标函数：

$$\min F_2=\alpha\sum_{i=1}^{m}|\Delta U_i|+\beta\sum_{j=1}^{k}(\eta_j-\eta_{\max}) \tag{7}$$

式中，F_2为配电网运行安全目标值；α和β分别为电压偏移与设备负载率的权重；ΔU_i为第i个节点的电压偏移

量；m 为配电网节点总数；η_j 为第 j 个设备的实际负载率；η_{max} 为设备允许的最大负载率。式(7)用于评价负荷接入后节点电压和设备负载水平，F_2 越小，表明接入方案对配电网运行状态的影响越小。

3.2　基于 DFT 的负荷接入优化求解

在深度优先遍历得到的候选接入节点及馈线运行数据的基础上，结合多目标决策模型对不同负荷接入方案进行优化。由于经济性、安全性和用户用电满意度的量纲不同，需先进行归一化处理，再通过加权方式构建负荷接入综合目标函数：

$$\max F=\omega_1\left(1-\frac{F_1}{F_{1\max}}\right)+\omega_2\left(1-\frac{F_2}{F_{2\max}}\right)+\omega_3 S \tag{8}$$

式中，F 为负荷接入优化综合目标值；$\omega_1,\omega_2,\omega_3$ 分别为经济性、安全性及用户满意度的权重；F_{1max} 为最大允许投资成本；F_{2max} 为最大允许安全目标值；S 为用户用电满意度。综合目标值越大，表明对应接入方案的综合评价结果越优。

进一步设置馈线容量、节点电压偏差和设备负载率约束：

$$\begin{cases} S_j \geqslant S_{load} \\ |\Delta U_i| \leqslant \Delta U_{max} \\ \eta_i \leqslant \eta_{max} \end{cases} \tag{9}$$

式中，S_j 为候选接入节点所在馈线分区的额定传输容量；S_{load} 为新增用户负荷容量；ΔU_{max} 为允许的最大电压偏移量。

4　实验验证

4.1　节点电压偏差测试

选取含 30 个节点、12 条馈线的 10 kV 配电网模拟系统作为实验对象，该系统包含不同负荷密度区域及多个馈线分区。采用本文模型完成馈线分区容量计算、扩容优先级确定及负荷接入优化，并选取 8 个典型节点作为测试点。按照 GB/T 12325—2008，从空载至 100% 额定负载逐级加载，每级稳定运行 3 min，记录各测试节点的电压数据。同时，选取传统遗传算法优化方法进行对比，实验结果如图 2 所示。

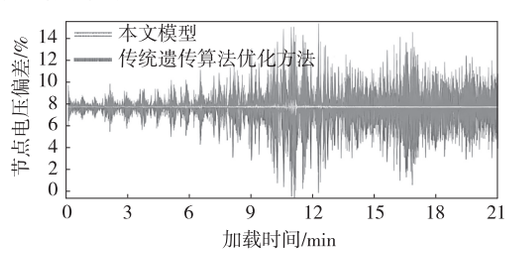

图 2　电压偏差率对比

由图 2 可知，应用本文模型后，各节点电压偏差变化较为平稳，最大值为 2.1%，最小值为 0.3%，平均偏差为 1.2%，整体保持在 ±3% 以内；应用传统遗传算法优化方法后，节点电压偏差波动较为明显，最大值为 4.8%，平均偏差为 3.5%。相比之下，本文模型能够将节点电压偏差控制在较小范围内，说明经过扩容规划与负荷接入优化后，各馈线分区的负荷分配更加合理，节点电压稳定性得到有效改善。

4.2　馈线负载均衡度测试

基于前述 10 kV 配电网模拟系统，设置 5 种典型负荷工况，分别采用本文模型、传统粒子群优化方法和传统遗传算法优化方法进行测试，并记录各工况下的馈线负载率，结果如图 3 所示。

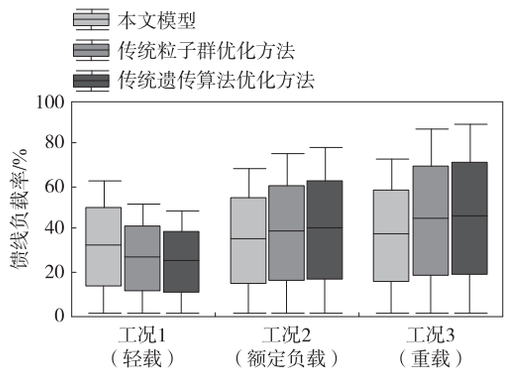

图 3　不同测试工况下的馈线负载率对比

由图 3 可知，本文模型在不同负荷工况下的馈线负载率保持在 62.3%~73.2% 范围内，波动幅度为 10.9%；传统粒子群优化方法和传统遗传算法优化方法的波动幅度分别为 35.2% 与 40.5%。相比之下，本文模型的馈线负载率变化更加平稳，波动幅度分别降低 69.0% 和 73.1%，说明该模型能够减小不同馈线之间的负荷差异，改善馈线负载不均衡问题。

5　结束语

本文围绕配电网扩容规划与业扩报装决策问题，利用深度优先遍历分析馈线拓扑及负荷分布，并结合分区容量评价、扩容优先级计算和多目标决策完成了负荷接入优化。实验结果表明，应用该模型后，节点电压平均偏差为 1.2%，馈线负载率波动幅度为 10.9%，均低于对比方法，说明本文模型能够在一定程度上改善节点电压偏差和馈线负载不均衡问题。后续可结合分布式电源接入及负荷波动等复杂运行场景，进一步完善模型并拓展其应用范围。

参考文献：

[1] 赵玉浩，李长云，张荣煜. 计及时变故障修复时间的配电网灾后抢修决策模型[J]. 电力自动化设备，2026，46(1)：92-98.

[2] 彭贺翔，廖凯，杨健维，等. 适应拓扑变化的配电网多时间尺度电压调控方法[J]. 电网技术，2025，49(7)：2918-2927.

（下转第 188 页）