

# 区域能源系统中变压器多维测度的 优化设计控制研究

梁旭耀<sup>1</sup>, 蒙国勇<sup>1</sup>, 黄广汉<sup>1</sup>, 陈源洋<sup>1</sup>, 蓝心<sup>1</sup>,  
颜永平<sup>1</sup>, 张茂杰<sup>2</sup>, 方华亮<sup>3</sup>

(1. 中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司, 南宁 530000;  
2. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

**摘要:** 针对现有多点分布式光伏电源接入配网后形成区域能源系统的变压器规划设计控制问题, 考虑配网中高层建筑负荷、分布式光伏的容量大小、空间位置构建源荷多维测度分析模型; 利用统计分析对分布式光伏的四季出力功率数据, 片区负荷的用电数据进行处理, 得到分布式光伏与负荷的四季时序曲线; 采用 K-means++ 算法对负荷区进行三维分区, 以负荷矩作为基本测度; 并考虑区域内负荷大小、距离、使用率等影响因素, 结合分布式光伏电源的时间特性及接入位置等多维测度, 研究了三维负荷矩测度的优化计算; 利用粒子群优化算法对该模型进行求解, 确定变压器位置与容量, 采用变压器优化配置双层模型对变压器位置及可控性进行评估与分析; 算例结果表明, 本研究在多维测度内能够降低变压器优化容量下综合经济成本, 变压器位置更接近分区的实际负荷中心。

**关键词:** K-means++; 多维测度; 变压器; 负荷矩; 双层模型

## Research on Optimal Design Control of Transformer Multi-dimensional Measure in Regional Energy System

LIANG Xuyao<sup>1</sup>, MENG Guoyong<sup>1</sup>, HUANG Guanghan<sup>1</sup>, CHEN Yuanyang<sup>1</sup>,  
LAN Xin<sup>1</sup>, XIE Yongping<sup>1</sup>, ZHANG Maojie<sup>2</sup>, FANG Hualiang<sup>3</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangxi Electric Power Design Institute CO., LTD, Nan Ning 530000, China;  
2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
3. School of Electrical and Automation Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Aimed at the transformer planning and design control problem of a regional energy system after existing multi-point distributed photovoltaic power supply is connected to a distribution network, based on the characteristics of high-layer building load in the distribution network, the capacity of distributed photovoltaic, and the spatial position, this paper presents a multi-dimensional measurement analysis model of source and load. The statistical analysis algorithm is used to process the four-season output power data of distributed photovoltaic and the power consumption data of the load in the area, and obtain the four-season time series curve of distributed photovoltaic and load. The K-means++ algorithm is used to achieve three dimensional partitioning of the load area, and the load moment is taken as a basic measure. By considering the influencing factors such as load size, distance and utilization rate in the region, and combining with the multi-dimensional measures such as time characteristics and access location of distributed photovoltaic power supply, the optimization calculation of three-dimensional load moment measure is studied. The particle swarm optimization algorithm is used to solve the model, and determine the location and capacity of the transformer. The two-layer model for the transformer optimal configuration is used to evaluate and analyze the location and controllability of the transformer. The calculation results show that this study can reduce the comprehensive economic cost under the optimal capacity of the transformer in the multi-dimensional measure, and the location of the transformer is closer to the actual load center of the partition.

**Keywords:** K-means++; multi-dimensional measure; transformer; load moment; two-layer model

## 0 引言

随着化石能源枯竭及造成的碳排放问题, 可再生能源

近年来快速发展, 尤其是我国的分布式光伏产业发展迅猛<sup>[1]</sup>。分布式光伏电源通常接入中、低压配电系统, 具有

收稿日期: 2024-05-11; 修回日期: 2024-06-07。

基金项目: 中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司科技项目(EM-2023-DW005)。

作者简介: 梁旭耀(1974-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 梁旭耀, 蒙国勇, 黄广汉, 等. 区域能源系统中变压器多维测度的优化设计控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 197-203.

配置灵活、可靠性高，便于临近负荷消纳等优点<sup>[2-3]</sup>。随着分布式光伏电源接入，在配电网规划中需要分布式光伏出力

和负荷预测的结果，确定变配电设备在电力系统的安装位置和容量等，使得保证整体规划结果的经济性、可靠性和安全性<sup>[4-6]</sup>。  
国内外针对配电网含分布式光伏电源的规划研究方面，已取得了较多的成果，文献 [7] 从配电公司与运营商的不同角度，为解决配电网分布式电源扩展规划问题，建立基于主从博弈的双层优化模型。文献 [8] 为实现配电网与可再生能源系统之间的协同规划，提出了一种多目标，多层次的主动配电网扩展规划方法。文献 [9] 为克服启发式方法收敛性和局部最优的缺点，提出了一种考虑可靠性成本的配电网多阶段扩展规划的混合整数线性优化模型。文献 [10] 针对配电网中含高比例分布式光伏电源出力随机性造成的稳定性减弱、经济成本增加的问题提出了一种多目标概率规划方法。文献 [11] 针对风力，光伏等新能源出力随机性造成的配电网规划困难问题，提出了一种结合碳足迹与改进生成对抗网络的电力系统多目标规划模型。文献 [12] 针对配电网的规划问题，以“负荷矩”作为计算模型，辅助确定变压器的最佳建设位置。

为此，本文考虑分布式光伏出力时间随机波动性，负荷用电特性，及区域区内分布式光伏、负荷三维空间分布的综合测度，提出了基于负荷矩测度分析的配电网中变压器设备选址定容方法，并建立变压器优化配置的双层优化模型。计算结果表明，相较于传统方法，使用本文提出的方法能够确定三维空间内合理的负荷分区，且变压器位置更贴近实际负荷中心，提高配电变压器规划的经济性。

## 1 光伏及负荷随机特性及分区

### 1.1 光伏及负荷随机特性分析

在考虑变压器设备位置选取前，还需要对负荷点进行更有针对性的数据分析，可将分布式电源视为对用户负荷直接供电。分布式光伏电源发电过程中受光照强度、风力因素等环境影响，存在间歇性与波动性，负荷在一天不同时刻也存在波动性。但光伏出力与负荷使用量在同一季节具有一定的相似性<sup>[13-15]</sup>。各季度光伏出力和负荷使用量的时序拟合曲线分别如图 1 与图 2 所示，采用的数据为某地光伏数据及负荷使用情况。从图中可以看出分布式光伏电源出力随季节变化明显，负荷在一天内随时间变化明显，季节间差别较大，夏季与冬季负荷使用量较大。通过处理分布式光伏电源不同季节的出力时序曲线，可以将每个季度的平均出力作为该季的实际出力，得到分布式光伏电源四季实际出力/峰值功率，如表 1 所示。

表 1 分布式光伏电源四季实际出力/峰值功率

	春季	夏季	秋季	冬季
分布式光伏电源	0.0973	0.1669	0.2025	0.1522

### 1.2 三维空间中负荷分区

当前城市配网负荷大多是高层建筑负荷，负荷分布位

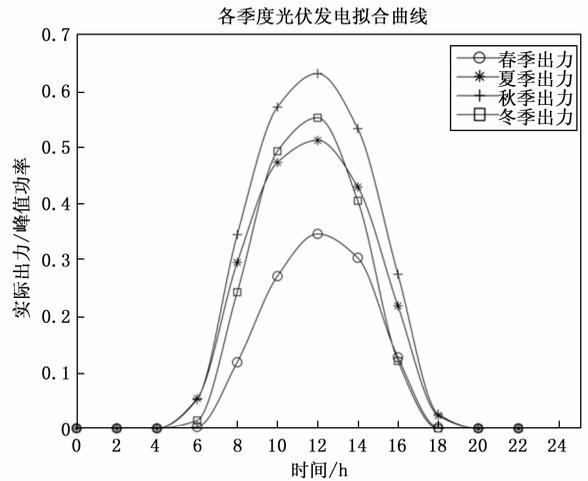


图 1 各季度光伏发电拟合曲线

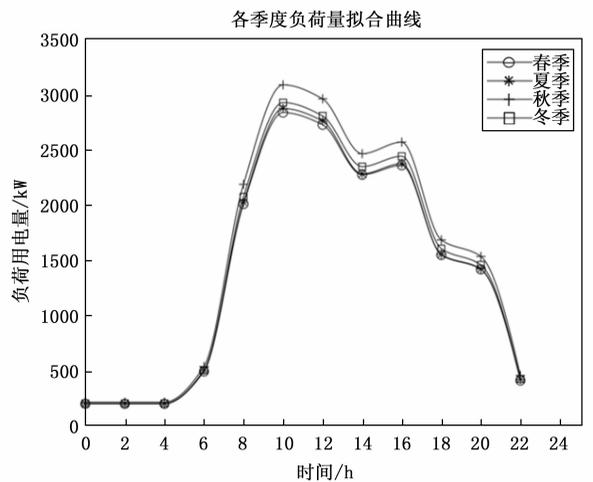


图 2 各季度负荷量拟合曲线

置为三维空间，与现有二维平面上负荷分区不同，如何进行优化分区是关键。配网中负荷点较多，如何考虑负荷点、光伏点分布位置，结合配网结构，确定变压器位置和容量是关键。变压器作为分布式光伏、负荷的接入点，其位置确定涉及到负荷与光伏的位置分布。负荷点分布基础上进行分区，在电力配电网中，若只确定单个位置作为所有变配电设备的安装位置，若某个变压器过载发生故障，将导致片区电力中断，影响电力系统可靠性。为满足电力系统的稳定性供电要求，采用负荷分区以实现负荷均衡，提高系统的运行效率，并能够满足整体负荷需求。

### 1.3 K-means++ 聚类算法

由于实际的电力系统中，片区内的负荷量较为庞大，需要基于全部负荷位置以及负荷容量大小进行负荷分区。文章采用 K-means++ 聚类方法进行负荷分区，该算法将负荷的地理位置相似性进行分组，并将相似的负荷归为同一负荷分区，旨在确保负荷分散到不同的负荷分区以实现负荷均衡<sup>[16-18]</sup>。常规的 K-means++ 算法完成聚类分区时用于二维数据点的聚类，目前我国建筑楼层越来越高，考

考虑负荷分布的高度十分必要, 也对变压器位置存在影响。因此在考虑负荷分区时需要在不同高度的负荷进行分区, 文章在三维空间上进行分析计算并分成若干个容量相近的小分区, 具体步骤如下:

1) 随机选择一个数据集  $X$  中的对象  $x_i$  作为第一个聚类中心, 令  $I=1$ ;

2) 分别计算其余对象与已选择的聚类中心之间的最短距离 (即到最近聚类中心的距离), 并按概率选择下一个聚类中心, 概率与距离的平方成正比, 共选出  $k$  个初始聚类中心  $m_j (I)$ ;

3) 使用公式 (1) 计算每个 3 维对象  $x_i$  到初始的  $k$  个聚类中心  $c_j (I)$  的三维距离  $d(x_i, c_j (I))$ , 确定距离  $d$  最近的聚类中心, 将  $x_i$  归入该类聚类区域  $S_j$  中。

$$d(i, j, k) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + (x_{i3} - x_{j3})^2} \quad (1)$$

式中,  $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$  与  $(x_{j1}, x_{j2}, x_{j3})$  分别是聚类对象与聚类中心。

4) 根据每个簇的数据, 求解出新的聚类中心点, 即每个簇的平均值;

5) 将新的聚类中心与前一次计算得到的  $k$  个聚类中心进行比较, 如果位置发生变化则转 3), 否则进行下一步;

6) 对不同的分区结果进行负荷容量计算, 将处于各分区边界的负荷进行重新分配, 以达到小分区的容量相近;

7) 输出最终的聚类结果。

#### 1.4 最优聚类数目确定

在 K-means++ 算法中, 聚类数目  $k$  是一个重要参数, 会影响负载分区的聚类结果。为了确定最佳的聚类数目, 可以通过人为计算确定。若  $k$  的取值过大会导致过度拟合, 聚类结果模糊且不具有代表性; 若过小会导致聚类不完整和不准确。

为确定最优  $k$  值, 可以使用肘部法计算每个样本点到其所属的中心点的距离的平方和 (SSE) 进行聚类效果评估<sup>[19]</sup>。SSE 值越小, 表明聚类效果越好, SSE 的计算公式为:

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in F_i} |q - c_i|^2 \quad (2)$$

式中,  $F_i$  代表第  $i$  个聚类簇;  $q$  为聚类簇  $F_i$  里的数据点;  $c_i$  为聚类簇  $F_i$  的聚类中心。

肘部法具有直观可靠的特点, 通过绘制  $k$  值与对应的 SSE 的曲线图, 可以找到曲线出现“肘部”的位置, 这个肘部点对应的  $k$  值可以被确定为最佳聚类数目, 再增加  $k$  值聚类效果不会得到明显提高。

## 2 三维负荷矩测度分析

确定最优聚类数目  $k$ , 完成规划区内的三维负荷分区后, 需要综合考虑分布式光伏电源及各负荷容量位置、大小与变压器位置的实际关系, 优化传统的衡量方式, 本文提出更满足实际情况的三维负荷矩测度分析。

### 2.1 负荷矩测度模型改进

负荷矩测度通常是指各负荷点的负荷量  $P$  与传输线路的长度  $l$  之积  $Pl$ 。负荷分区完成后, 通过计算分区内不同位置到各负荷的负荷矩, 确定负荷的集中程度和负荷的重要性。通常情况下将变压器布置在负荷矩中心, 以便更好地满足负荷需求, 减小输电线路长度和电能损耗, 提高电力供应的可靠性和经济性<sup>[20]</sup>。传统的变配电设备选址优化模型只针对二维平面, 利用式 (3) 进行计算, 即:

$$\min NF = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \beta P_j d_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^m \delta_{ij} = 1 (j = 1, 2, \dots, n) \\ & \sum_{j \in m_r} P_j \leq \eta S_i \cos \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $NF$  为该配电网的负荷矩测度值,  $\delta_{ij}$  为标志参量, 当第  $i$  个变压器向第  $j$  个负荷点供电时为 1, 否则为 0;  $\beta$  为配电网单位负荷、单位距离的损耗系数;  $P_j$  为第  $j$  个负荷点的功率;  $S_i$  为第  $i$  个变压器的容量;  $\eta$  为负载率;  $\cos \varphi$  为负荷功率因数;  $d_{ij}$  为第  $i$  个变压器到达第  $j$  个负荷点的距离。

传统负荷矩法未针对负荷的种类与特性进行分析, 而且并未考虑相同时间点的负荷使用率差异性, 因此在工程的实际应用过程中, 可能导致计算得出的负荷中心点的位置与实际位置出现偏差。且在常规负荷矩计算时, 负荷的位置通常被视为二维平面的一个点, 忽略了高度信息, 因此本文在进行负荷矩测度计算时, 将负荷在高度上的坐标加入计算过程。

为减小这种偏差对变配电设备选址定容产生的不利影响, 本文采用一种改进负荷矩测度模型, 将负荷同时使用率  $k_c$  (同一时刻, 不同子网内各负荷点的最大负荷量之和与电网整体的最大负荷之比) 与曲折系数  $k_l$  (实际线路的铺设长度  $l'$  与起止点的欧式距离  $l$  的比值) 加入模型中。由于分布式光伏电源的发电量与整个区域的负荷用电量相比较小, 可将分布式光伏电源视为对区域内的负荷点直接供电, 将负荷点处的分布式光伏电源容量  $P_{DG_i}$  引入 (若没有分布式电源则  $P_{DG_i}$  为零),  $P_{DG_i}$  的实际出力跟随四季变化。结合  $k_c$  与  $P_{DG_i}$  计算各负荷点的负荷容量等效值  $P_{eq_i}$ , 即:

$$P_{eq_i} = k_c (P_i - P_{DG_i}) \quad (5)$$

因此计及分布式光伏电源接入的改进负荷矩测度的目标函数如式 (6) 所示:

$$\min f = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_c k_l \delta_{ij} (P_i - P_{DG_i}) \times \sqrt{(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2 + (0 - z_i)^2} \quad (6)$$

式中,  $(x_i, y_i, z_i)$  为负荷点的坐标值;  $(u_j, v_j, 0)$  为改进负荷矩中心坐标值;  $n$  为负荷点个数。

### 2.2 约束条件

1) 电压约束:

$$U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max} \quad (7)$$

式中,  $U_{j\max}$ 、 $U_{j\min}$  分别表示第  $j$  个负荷的电压上、下限。

2) 支路容量约束:

$$S_{ij} \leq S_{ij\max} \quad (8)$$

式中,  $S_j$ 、 $S_{j\max}$  分别表示配电网中支路  $ij$  上实际流过的功率以及允许流通的功率最大值。

3) 分布式光伏 DG 功率约束:

$$P_{DGj} \leq P_{DGj\max} \quad (9)$$

式中,  $P_{DGj}$ 、 $P_{DGj\max}$  分别表示配电网中第  $j$  个负荷连接的 DG 实际出力值和该 DG 的额定容量。

4) 功率平衡约束方程 (潮流约束):

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (10)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (11)$$

式中,  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为第  $i$  个节点注入的有功和无功功率,  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳,  $\delta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间电压相角差,  $U_i$ 、 $U_j$  为节点  $i$  与节点  $j$  的电压。

### 3 基于三维测度的变压器优化配置模型

在配电网的规划过程中, 基于负荷的大小和分布情况进行负荷三维分区, 针对分区结果利用改进负荷矩测度计算方式, 确定三维负荷矩中心 (即变压器的位置)。建立含分布式光伏电源接入的变压器优化配置模型, 对负荷矩中心进行评估, 主要分为经济层与物理层。其中, 模型上层为经济层, 以固定投资成本、系统的运行成本、设备的维护成本为目标函数, 评估负荷矩中心的经济性; 模型下层为物理层面, 以线路系统中的电压损耗和功率损耗为目标函数, 评估负荷矩中心的物理合理性<sup>[21-22]</sup>。

#### 3.1 上层经济层

上层经济层优化目标包含设备固定投资成本、运行经济成本与维护成本, 如式 (12) 所示:

$$\min C_{\text{TOTAL}} = C_{\text{INV}} + C_{\text{OPE}} + C_{\text{SERV}} \quad (12)$$

式中,  $C_{\text{TOTAL}}$  为配电网的变配电设备综合投资费用;  $C_{\text{INV}}$  为电网变配电设备固定投资成本;  $C_{\text{OPE}}$  为运行成本;  $C_{\text{SERV}}$  为维护成本。

其中电网变配电设备固定投资成本  $C_{\text{INV}}$  包括变压器与线路的固定建设投资成本; 运行成本  $C_{\text{OPE}}$  包括网络损耗经济成本、网络运行成本; 维护成本  $C_{\text{SERV}}$  包括维修成本, 养护成本以及报废成本。

1) 变配电设备固定建设投资成本  $C_{\text{INV}}$  其中电网变配电设备固定投资成本  $C_{\text{INV}}$ , 如式 (13) 所示, 包括变压器与线路的固定建设投资成本:

$$C_{\text{INV}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda \delta_{ij} k_i l_{ij} + \sum_{i=1}^m g(T_i) \quad (13)$$

式中,  $\lambda$  为变压器低压侧单位长度投资费用;  $k_i$  为曲折系数;  $l_{ij}$  为变压器  $i$  到第  $j$  个负荷点的直线距离;  $g(T_i)$  为第  $i$  台变压器选定地理位置与型号后的设备造价;  $m$  为变压器的总数量;  $n$  为负荷的总数量。

2) 变配电设备运行成本  $C_{\text{OPE}}$ :

$$C_{\text{OPE}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \eta k_i P_{ij}^2 l_{ij} + \sum_{i=1}^m f(T_i) \quad (14)$$

式中,  $\eta = (\eta_1 \eta_2 \eta_3) / U^2$  为电力网络中的网损折算系数, 其中  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$  分别表示电价, 线路单位长度 (km) 的电阻值以及年损耗小时数;  $U$  为配电线路的电压额定值;  $P_j$  为第  $j$  个负荷点的有功功率值;  $f(T_i)$  为变压器投入使用后的费用, 主要包含设备老化费用、技术人员培训与工资等, 一般取变压器设备造价的 10%, 即  $0.1 g(T_i)$ 。

3) 变配电设备养护成本  $C_{\text{SERV}}$ :

$$C_{\text{SERV}} = C_M + C_F + C_D \quad (15)$$

式中,  $C_M$  为变压器的维护费用, 由于在整体费用中占比很小, 采用维护折算系数  $\tau$  乘上固定建设投资成本  $C_{\text{INV}}$ ,  $\tau$  一般取 1%~1.5%;  $C_F$  为故障成本,  $C_F = h * \mu * C_r * \text{ART}$ ,  $h$  是停电的间隔数值,  $\mu$  是设备的故障率数值,  $C_r$  是故障停电平均维修成本, ART 是设备的平均修复时间;  $C_D$  是变压器的报废成本, 为简化计算将报废成本  $C_D$  取为变压器固定投资成本的 4%。

#### 3.2 下层物理层

下层物理层是在片区内分布式光伏接入配电网后, 为衡量变压器在选址确定时的系统稳定性, 以电压偏差与功率损耗为指标建立模型。由于电压损耗  $\Delta U\%$  与功率损耗  $\Delta S$  量纲不同, 需要进行归一化后建立目标函数, 如式 (16) 所示:

$$y = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (16)$$

式中,  $x$  为目标函数值;  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为目标函数的最大值和最小值;  $y$  为归一化后的目标函数值。

在下层物理层中主要优化目标包含电压损耗  $\Delta U\%$  与功率损耗  $\Delta S\%$ , 文中根据负荷的时间特性, 将四季的负荷使用情况与光伏出力情况纳入计算过程。具体为, 分别取四季的一天, 每 2 个小时取一个时间点, 每一天共 12 个时间点, 四季一共 48 个时间点的电压损耗与功率损耗进行计算, 计算公式如式 (17) 所示:

$$\min G_{\text{PHY}} = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \Delta U_{ij,t} \% + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \Delta S_{ij} \% \quad (17)$$

式中,  $G_{\text{PHY}}$  为该配电网的损耗总值;  $T$  为调度周期内的时段总数, 文中为 48,  $n$  为节点总数,  $\Delta U_{ij} \%$  为归一化的电压损耗,  $\Delta S\%$  为归一化的功率损耗。

配电系统中变压器  $i$  到负荷点  $j$  处的电压损失  $\Delta U_{ij} \%$  如式 (18) 所示:

$$\Delta U_{ij} \% = \frac{R_{ij} (P_{t,ij} - P_{PV,t,ij}) + X_{ij} \cdot (Q_{t,ij} - Q_{PV,t,ij})}{U_N^2} \quad (18)$$

式中,  $U_N$  为变压器低压侧的电压,  $P_{t,ij}$  为  $t$  时刻第  $i$  个变压器接入第  $j$  个负荷点的负荷有功功率值,  $P_{PV,t,ij}$  为  $t$  时刻第  $i$  个变压器接入第  $j$  个负荷点的分布式光伏电源有功功率出力值,  $Q_{t,ij}$  为  $t$  时刻第  $i$  个变压器接入第  $j$  个负荷点的负荷无功功率值,  $Q_{PV,t,ij}$  为  $t$  时刻第  $i$  个变压器接入第  $j$  个负荷点的分布式光伏电源无功功率出力值,  $R_{ij}$  为传输线路  $ij$  的电阻值,  $X_{ij}$  为传输线路  $ij$  的电抗值。

考虑功率损耗, 可得变压器  $i$  到负荷点  $j$  处的功率损耗

$\Delta S_{ij} \%$  如式 (19) 所示:

$$\Delta S_{ij} \% = \frac{P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2}{S_i \cdot U_N^2} (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (19)$$

式中,  $S_i$  为第  $i$  个变压器的视在功率。

### 4 模型求解

#### 4.1 粒子群优化算法

标准粒子群算法中粒子根据个体的最优解和种群的最优解通过式 (20) 和式 (21) 来更新自身速度值和位置。

$$v_{ij}(t+1) = \omega \times v_{ij}(t) + c_1 \times \text{rand}_1 \times [p_{\text{best}}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 \times \text{rand}_2 \times [g_{\text{best}}(t) - x_{ij}(t)] \quad (20)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (21)$$

式中,  $\omega$  是惯性因子;  $v_{ij}(t)$  是粒子速度;  $x_{ij}(t)$  是粒子位置;  $\text{rand}_1$  和  $\text{rand}_2$  是介于  $[0, 1]$  之间的随机数。式 (20) 的 3 个部分分别称为记忆项、自身认知项和群体认知项, 代表粒子的速度受上次速度的大小方向、自身经验和群体经验的影响, 式 (21) 为粒子的位置更新公式。

#### 4.2 求解步骤

本文中改进负荷矩模型及变压器优化配置双层模型求解过程如图 3 所示。求解的具体步骤如下:

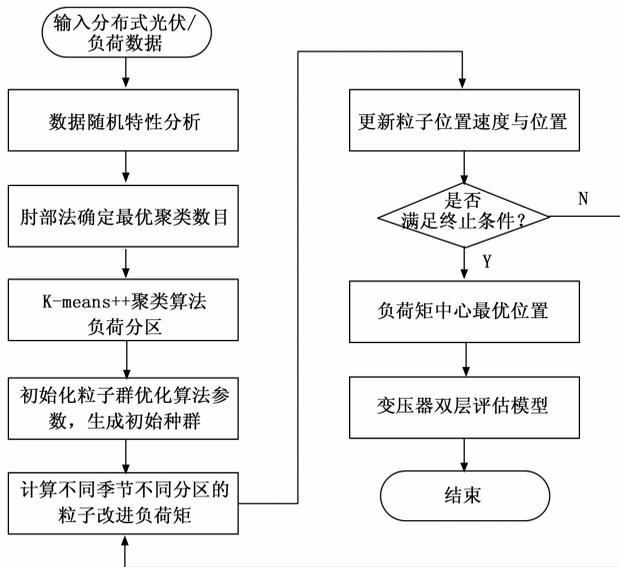


图 3 配电网变压器优化配置求解流程图

1) 对光照信息以及负荷信息进行预处理, 得到分布式光伏电源的出力情况与负荷的使用情况;

2) 根据肘部法确定最优聚类数目, 采用 K-means++ 聚类方法对片区内的负荷进行三维负荷分区, 生成若干个负荷容量相近的小分区。

3) 输入各负荷分区结果, 初始化粒子群算法参数, 生成初始种群, 针对各负荷分区的不同季节时间特性进行个体的改进负荷矩计算, 并将种群个体进行不断更新, 确定负荷分区的负荷矩中心;

4) 采用变压器优化配置双层评估模型对负荷矩中心进行物理层、经济层的指标计算。

### 5 算例分析

以某地的配电网区域为算例, 如图 4 所示, 区域内主要为办公行政区域, 由一栋高层建筑, 若干个低层建筑及地面建筑构成, 该区域内的负荷总量为 3 698.2 kW。在计算过程中, 以负荷分区的几何中心点的三维坐标近似代替负荷, 在进行负荷分区时为简化计算, 将同一楼层且距离相近的负荷视为同一负荷, 并将坐标平均值作为新的负荷坐标, 得出该地区的各负荷点数据如表 2~7 所示。

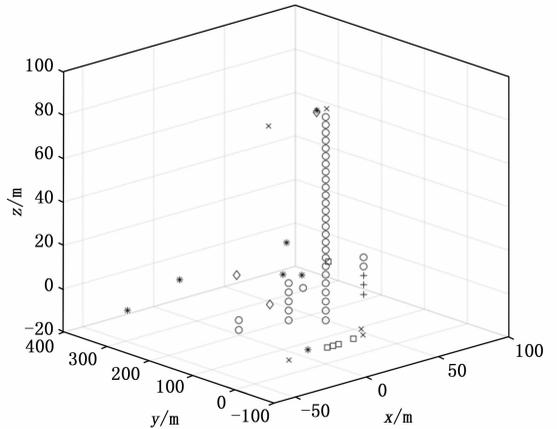


图 4 某地配电网负荷分布图

表 2 6 类区域负荷数据

五类负荷	照明	动力	厨房	空调	消防
负荷/kW	1 621.6	700.3	125.05	208.5	488
同时率/%	95	95	95	95	30

表 3 照明负荷

编号	坐标	负荷/kW	编号	坐标	负荷/kW
1	(0,0,0)	258.3	19	(0,0,68.4)	38.8
2	(0,0,4.5)	39.2	20	(0,0,72)	38.8
3	(0,0,8.7)	44	21	(0,0,75.6)	38.8
4	(0,0,12.9)	45.6	22	(0,0,79.2)	38.8
5	(0,0,17)	56	23	(0,0,82.8)	39.4
6	(0,0,21)	37.6	24	(0,0,86.4)	38.8
7	(0,0,24.9)	47.2	25	(0,0,90)	38.8
8	(0,0,28.8)	36.48	26	(0,0,93.6)	38.8
9	(0,0,32.4)	36.48	27	(-14,6.5,17)	64.1
10	(0,0,36)	36.48	28	(-14,40,0)	59
11	(0,0,39.6)	39.44	29	(-14,40,4.5)	86.6
12	(0,0,43.2)	38.8	30	(-14,40,8.7)	28
13	(0,0,46.8)	38.8	31	(-14,40,13)	25
14	(0,0,50.4)	38.8	32	(-14,40,17)	37
15	(0,0,54)	38.8	33	(44,57,12.9)	23.2
16	(0,0,57.6)	38.8	34	(44,57,17)	9.6
17	(0,0,61.2)	38.8	35	(-44,57,0)	8.64
18	(0,0,64.8)	38.8	36	(-44,57,4.5)	21.1

表 4 动力负荷

编号	坐标	负荷/kW	编号	坐标	负荷/kW
37	(-5.4,97.2)	70.2	41	(-64,250,0)	39.6
38	(-9.5,24,21)	15	42	(-9,310,0)	140
39	(-16,46.5,21)	60.8	43	(74,335,0)	160
40	(-18,-18,-9)	214.7			

表 5 厨房动力负荷

编号	坐标	负荷/kW	编号	坐标	负荷/kW
44	(44,57,0)	11.53	46	(44,57,8.7)	68.8
45	(44,57,4.5)	44.72			

表 6 空调负荷

编号	坐标	负荷/kW	编号	坐标	负荷/kW
47	(16,46.5,21)	11.13	50	(-4,-30,-9)	19.95
48	(12,-25,-9)	36.75	51	(-8,-30,-9)	73.44
49	(0,-30,-9)	67.23			

表 7 消防动力负荷

编号	坐标	负荷/kW	编号	坐标	负荷/kW
52	(1,1,97.2)	40	55	(20,-21,-9)	113.3
53	(-41,-2.4,97.2)	30	56	(-37,-36.5,-9)	165
54	(16,-30,-5)	139.7			

表 8 变压器选型投资造价表

编号	容量/kVA	造价/万元	编号	容量/kVA	造价/万元
1	500	4.544	5	1250	8.76
2	630	5.538	6	1600	10.565
3	800	6.53	7	2000	12.58
4	1000	7.25	8	2500	14.725

表 9 分布式光伏电源数据

编号	坐标	峰值功率/kW
1	(-7,-2,97.2)	40
2	(-44,62,24.9)	75
3	(-3,120,0)	136

图 5 中“+”表示最优负荷矩中心，其坐标为四季下变压器选址位置，“\*”表示四季的负荷矩中心。因 2、3 号分布式光伏电源均接入同一个分区，因此其中一个分区的四季负荷矩中心未发生改变，最优负荷矩中心为四季的负荷矩中心的平均值。表 10 为应用改进负荷矩模型得出的最优负荷中心坐标值以及含有分布式光伏电源接入的负荷分区结果。

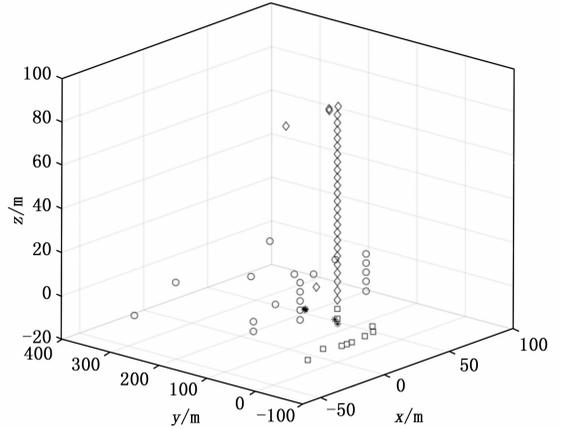


图 5 计及分布式光伏电源四季影响的变压器选址区域

表 10 负荷分区及负荷中心最优选址

分区编号	负荷及光伏电源编号	分区内总负荷/kW	四季负荷矩中心位置	负荷矩中心最优位置
1	1-2, 40, 48-51, 54-56	1 127.57	四季: (-5.4, -13.8, 0)	(-5.4, -13.8, 0)
2	28-36, 38-39, 41-47, 2-3(光伏)	1 060.72	春:(1.7, 70.4, 0) 夏:(0.6, 68.5, 0) 秋:(0, 67.5, 0) 冬:(0.8, 68.9, 0)	(0.78, 68.8, 0)
3	3-27, 37, 52-53, 1(光伏)	1 206.18	春:(-1.8, 0.6, 0) 夏:(-1.7, 0.6, 0) 秋:(-1.7, 0.5, 0) 冬:(-1.8, 0.6, 0)	(-1.8, 0.6, 0)

在确定负荷矩中心后，利用变压器双层优化配置模型对负荷矩中心进行评估，分别按式 (12) 与式 (17) 对负荷矩中心的经济成本以及物理损耗进行计算。经济模型中主要为分区的变配电设备的固定投资成本，电网运行成本以及系统的维护成本。相较于传统负荷分区，文中采用调整边界负荷的方法，使得各分区负荷相对均匀，变压器的供电负荷存在不同，文中变压器容载比取 1.4。各分区的负荷视在功率值分别为 1 326.8、1 248、1 419.2 kVA。通过比较传统负荷矩模型与计及不同季节分布式电源改进负荷矩模型的费用与电压稳定性进行综合评价，相关数据如表 11 所示。

表 11 双层优化配置模型参数表

参数	名称	数值
$\lambda$	配电线路单位长度造价/(元/m)	145
$\eta_1$	当前电价/(元/kWh)	0.5
$\eta_2$	线路每公里电阻/( $\Omega$ /km)	0.387
$\eta_3$	线路年损耗小时数	2 900
$h$	停电间隔数	2
$\mu$	设备故障率	0.3%
ART	设备平均修复时间/h	15

表 12 双层规划模型综合评价

	传统负荷矩测度模型	改进负荷矩测度模型
变压器配置方案	1×1 600 kVA 1×2 000 kVA 1×2 500 kVA	3×2 000 kVA
运行费用/万元	3.82	3.802
变压器设备造价/万元	37.87	37.74
维护费用/元	3.67	3.64
经济层总费用/万元	102.85	101.6
分区 2 电压偏差	2.36	2.33
分区 2 功率损耗/kW	1.337	1.327

从表 12 中可以得出, 针对含有高层楼房的三维负荷片区采用改进的负荷矩模型能, 相较于传统负荷矩模型的变压器配置方案费用、运行费用、变压器设备造价费用均得到减少, 经济层面总费用减少 1.22%, 总体的经济性得到改善。由于存在负荷的分区不同, 传统模型与改进的负荷矩模型仅在分区 2 内的负荷相同。在分区 2 内, 相较于传统模型, 改进的负荷矩模型所确定的变压器位置, 在四季的电压偏差与功率损耗均得到降低, 更接近于实际的负荷矩中心。

## 6 结束语

本文针对分布式光伏接入配网规划中变压器容量和空间位置优化设计控制问题。考虑分布式光伏电源的时间特性、可利用小时数及位置, 结合负荷的同时使用率、线路曲折系数等因素建立三维综合负荷矩多维测度模型。并利用粒子群优化算法对各分区的负荷矩中心进行求解, 得到四季的负荷矩中心并确定最优负荷矩中心。确定变压器的最优位置后, 通过变压器配置双层模型对该位置及可控性进行评估, 与传统负荷矩的计算结果比较可得, 文中的方法在满足容量配置以及配电网稳定性要求的基础上, 变压器规划控制综合经济成本最优, 且更接近实际的负荷中心、分布式光伏消纳最优。

## 参考文献:

[1] LI H, LIN H, TAN Q, et al. Research on the policy route of China's distributed photovoltaic power generation [J]. Energy Reports, 2020, 6: 254-263.

[2] 郑剑锋, 李天伦, 毛树人, 等. 分时电价下用户侧光储系统优化控制策略 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 106-110.

[3] 程杉, 傅桐, 李洋洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (22): 1-12.

[4] 张姚, 段青, 沙广林, 等. 基于配电网重构的固态变压器双层选址方法 [J]. 北京交通大学学报, 2021, 45 (6): 65-70.

[5] 杨宏超, 程若发, 贺志华, 等. 链式多智能体遗传算法在分布

式电源全时序上优化配置 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 201-204.

[6] 冯喜春, 韩璟琳, 赵辉, 等. 主从博弈框架下配电网规划运行多目标协同优化方法 [J]. 南方电网技术, 2023, 17 (1): 26-34.

[7] 赵志强, 辛超山, 姜小琳, 等. 基于主从博弈的配电网源网协调扩展规划 [J]. 电测与仪表, 2023, 60 (3): 9-18.

[8] 王文宾, 朱燕舞, 赵辉, 等. 含可再生能源和储能系统的主动配电网系统协同规划 [J/OL]. 中国测试: 1-9.

[9] 张军达, 卢姬, 常俊晓, 等. 考虑可靠性成本的配电网多阶段扩展规划方法 [J]. 电测与仪表, 2023, 60 (11): 113-122.

[10] 惠慧, 李蕊, 朱逸楠, 等. 含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法 [J]. 电测与仪表, 2023, 60 (11): 2-10.

[11] 米阳, 周杰, 卢长坤, 等. 基于改进生成对抗网络与碳足迹的配电网多目标双层规划 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-15.

[12] 冯超, 钱璟, 黄宏盛, 等. 基于负荷矩理论的配电网线路规划与变压器选址优化 [J]. 浙江电力, 2015, 34 (2): 5-8.

[13] 李猛, 王利利, 陈鹏浩, 等. 一种直流配电网中换流站的选址定容方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (21): 109-116.

[14] 熊伟笑, 高辉, 陈璐, 等. 考虑负荷时序特性的居民柔性资源低碳协同方法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (10): 188-193.

[15] WANG C, ZHANG L, ZHANG K, et al. Distributed energy storage planning considering reactive power output of energy storage and photovoltaic [J]. Energy Reports, 2022, 8: 562-569.

[16] 王继东, 顾志成, 葛磊蛟, 等. 改进萤火虫算法与 K-means 算法结合的配电网负荷聚类特性分析 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2023, 56 (2): 137-147.

[17] 黄冬梅, 葛书阳, 胡安铎, 等. 采用中心优化和双尺度相似性度量的改进 K-means 负荷聚类方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33 (12): 93-100.

[18] 卓结彬, 史文迪, 朱亚东, 等. 变电站选址定容规划模型研究 [J]. 电工电气, 2018 (8): 46-50.

[19] 金之榆, 王毛毛, 史会磊. 基于 DBSCAN 和改进 K-means 聚类算法的电力负荷聚类研究 [J]. 东北电力技术, 2019, 40 (6): 10-14.

[20] TANG C, ZHU S, LI J, et al. A modified optimization model for the location selection of distribution transformer used in rural power network [J]. Journal of Computers, 2014, 9 (4): 875-882.

[21] 杨楠, 李宏圣, 袁景颜, 等. 计及不确定性和全寿命周期成本的配电变压器规划方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (21): 94-104.

[22] XIAO J, YE Y, WANG F, et al. Comprehensive evaluation index system of distribution network for distributed photovoltaic access [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 892579.