DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0163-04.

大数据接入下的主动配电网双层定性规划方法

黄存强，安 娟，田 旭，李俊贤，米金梁

(国网青海省电力公司经济技术研究院,青海 西宁 810000)

摘 要: 由于没有考虑到历史数据负荷变化对当前电网的影响,造成配电网无法最优状态运行,因此设计一种考虑大数据的主动配电网双层定性规划方法。以风电机组为例,在K-means聚类算法下得到聚类中心曲线与配电网区域间的联系程度描述方式,构建配电网电源出力负荷时序场景,获取配电网上、下层的规划模型,以网损和电压偏差作为优化指标,得到最优的主动配电网双层定性规划方法。算例分析结果表明:不同季节下,所设计的规划方法的算例配电网网损和电压偏差都低于传统的规划方法,说明该规划方法在实际的应用中能够提升配电网的运行状态。

关键词: 大数据;主动配电网;K-means聚类算法;目标函数

中图分类号:TP181 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0163-04

Two-level Qualitative Planning Method for Active Distribution Network under Big Data Access

HUANG Cun-qiang, AN Juan, TIAN Xu, LI Jun-xian, MI Jin-liang

(Economic and Technological Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000 China)

Abstract: Because the impact of historical data load changes on the current power grid is not considered, the distribution network cannot operate optimally, so this paper designs a two-level qualitative planning method for active distribution network considering big data. Taking the wind turbine as an example, under the K-means clustering algorithm, the description method of the connection degree between the cluster center curve and the distribution network region is obtained, the power output load sequence scenario of the distribution network is constructed, the planning model of the distribution network and the lower layer is obtained, and the optimal active distribution network two-level qualitative planning method is obtained by taking the network loss and voltage deviation as the optimization indicators. The analysis result of the example shows that under different seasons, the network loss and voltage deviation of the distribution network using the planning method designed in this paper are lower than that of the traditional planning method, indicating that the planning method can improve the operation status of the distribution network in practical application.

Keywords: big data; active distribution network; K-means clustering algorithm; objective function

0 引言

随着以分布式发电为代表的大规模可再生能源规模化并网,配电系统传统网架结构和运行方式难以满足新能源大规模并网消纳需求。目前国内外学者主要从系统可靠性和经济性角度研究配电网规划问题,而对于配电网中的分布式电源接入及需求响应对电压质量影响方面的研究较少。因此有必要深入研究大数据条件下主动配电网规划方法,以进一步提高配网运行安全性和可靠性、降低配电网网损;同时,利用分布式发电侧的资源调节能力满足负荷侧对电能质量提升的需求,以实现经济、高效、安全的配电网运行。

马瑞等人提出基于随机模糊机会约束的主动配电网分布式风电双层规划模型[1],通过判断上层方案静态安全指标是否满足随机模糊机会约束的置信水平进行上下层规划协同,从而构建一种分布式风电容量配置随机模糊机会约束双层规划新模型。最后提出结合随机模糊模拟,前推回代潮流计算和遗传算法对模型求解。张忠会等人提出基于自适应ε-支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型采用保留端点的自适应ε-支配多目标粒子群算法求解[2]。

已有的规划方法中,主要是将主动配电网中的分布式能源供应出力视为恒定[3-4],没有考虑到历史数据负荷变化对当前电网的影响,影响最终的规划效果,因此本文设计一种考虑大数据的主动配电网双层定性规划方法。

1 主动配电网双层定性规划方法研究

1.1 基于大数据分析配电网电源出力负荷时序场景

*基金项目:国网青海省电力公司经济技术研究院专题研究项目(SGQHJY00GHJS2100251)

收稿日期:2023-09-21

在典型的配电网的负荷曲线，当负荷出现峰谷差时，将会导致配电网供电质量下降，从而出现“负”潮流状态，不利于负荷的消纳。配电网中复杂输电线路的连接度值计算过程中，为了简化计算过程，对配网中各电力节点进行等效处理：采用节点间电压等级相同、电流方向相反、支路负荷功率相同或负荷功率相等情况下进行等效处理[5-7]。因此为了保证配电网的供电可靠性和充分利用电力系统中的富余容量，应在规划时对配电网的实时出力和负荷曲线进行分析。对于主动配电网来说，首先需要分析分布式电源的出力数学模型。通过对不同类型分布式电源在不同场景下不同时刻的出力数据进行建模，将得到每一种典型应用场景下各类型分布式电源在不同时刻所占配电网总负荷比例以及相应时段内所需配置分布式电源的个数[8]。进而可以通过各类型风电、光伏及抽水蓄能等分布式发电机的出力时序情况获得配电网总运行功率与各分布式电源实时可用容量之间的平衡关系。以风电机组为例，其输出功率与风电安装地点的风速之间关系如下式所示：

$$P_w\begin{cases}0 & 0\le v<v_i,\ v_0\le v\\ P_{wr}\dfrac{v-v_i}{v_s-v_i} & v_i\le v<v_s\\ P_{wr} & v_s\le v<v_0\end{cases} \tag{1}$$

式中，v_s为分布式电源正常功率下的额定风速，v_i为分布式电源接入配电网时的瞬时风速，v_0为分布式电源切出配电网时的瞬时风速。P_{wr}表示风电机组的额定功率。

以上述分析为基础，利用主动配电网历史数据，并对数据进行深层挖掘，建立典型的时序场景[9-10]。由于目前还没有一个完整的分布式电源时序场景信息描述标准，因此为了解决分布式电源与配变系统交互关系所带来的数据特征复杂、建模难度大、计算时间长等问题，本文采用K-means聚类算法，对场景相似度对时序进行缩减，获取典型的配电网时序负荷场景。建立的配电网时序负荷场景包含了不同时间下配电网电压电流特性和潮流等基本信息[11-12]。其中配变系统拓扑结构采用基于拓扑分析和能量传递分析方法形成的拓扑结构进行建模：当考虑到配网结构中存在复杂输电线路时，将建立在实际规划中对不同类型线路具有一定区分度的配电间关系场景。在K-means聚类算法下构建时序负荷场景，首先选定聚类数目，表示为M，从原始的时序负荷场景中选择M个聚类中心，聚类过程中利用欧氏距离作为聚类的判断依据。欧氏距离的计算公式为：

$$d(\varphi_i,\varphi_j)=\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\left(\varphi_i(n)-\varphi_j(n)\right)^2} \tag{2}$$

式中，$d(\varphi_i,\varphi_j)$表示时序场景中，不同负荷点之间的距离，$\varphi_i(n)$和$\varphi_j(n)$表示不同场景中的第n维度的负荷数据点。

经过以上计算，不断对聚类中心点进行更新，经过反复迭代之后，直至聚类中心点不再改变，聚类中心曲线在配电网各区域间建立了一种联系程度描述方式，包括区域连接度和局部关联程度两个部分，其中连接度即为各区域间联系方式及对应关系的数值。确定最优的M值之后，根据历史配网负荷场景，根据公式(1)获取分布式电源的功率，得到配电网电源出力负荷时序场景。

1.2 建立配电网双层定性规划模型

主动配网规划是一项复杂的系统工程，其目的是最大限度地提高供电可靠性，降低网损，减少运行费用。对于双层的定性规划来说，配电网的上层规划中，在保证供电可靠性、网损、运行费用最小的前提下，根据分布式电源及负荷特性，利用最优负荷曲线确定配电方式及网架结构；下层规划则是在上层模型确定的运行策略下，根据分布式电源与配电网特性以及经济性指标，确定分布式电源最优出力方式和运行曲线。通过优化运行策略，达到经济性和可靠性兼顾的目的。上层规划模型中，电压、负荷以及综合指标之间通过函数形式的数学表达式表示为：

$$Y=\varepsilon^2\frac{nf(i)}{x(i)}\lambda\cdot T \tag{3}$$

式中，$x(i)$为i个配网对象中的用户数；Y表示供电能力目标；$f(i)$表示分布式电源出力系数；ε为第j级目标的成本费用因子；λ为分布式电源容量系数；n为总投资成本率，一般情况下n的取值范围为1.4-1.9，T为总投资收益率；上层规划的目标函数是在满足配电网络结构简单的前提下，尽可能多地接纳分布式电源，使得负荷预测精度达到最优；满足配电网络结构简单的前提下，尽可能多地接纳分布式电源，使得网损尽量小。

在计算过程中，确定配电系统各节点的供电可靠性指标，确定各个目标函数的求解参数，获取计算配电网各节点的优化负荷曲线和对应系统各节点的综合最优负荷量，最终才能够计算所有节点中满足配电可靠性要求和综合资源利用要求的最优负荷量，求出各目标函数下各节点所需参数。下层的模型建立过程中，以电压偏差作为新的指标进行计算。其计算公式为：

$$U_a=\frac{1}{X-1}\sum_{i=1}^{X-1}\left(2V_{i+1}-V_i\right) \tag{4}$$

式中，X为配电网中的节点数量，V_i为其中某节点i的电压幅值。

根据式(4)可知，其电压的偏差指标与电压幅值相关。上层规划以最大供电可靠性为目标，下层规划以负荷预测精度、网损、运行费用最小为原则。综合网损、电压偏差等，得到的配电网双层定性目标规划模型为：

$$F(X)=\left[\max\left(Y(x),\right),\max\left(U_a(x)\right)\right] \tag{5}$$

对以上模型进行求解，即可得到大数据接入下的主动配电网双层定性规划方法的最优解。

1.3 模型求解

在得到的上述模型中，想要获取最优的规划方法，需要对模型进行求解。模型求解的过程中，首先，需要明确目标函数。对于配电网来说，建立满足供电可靠性要求、网损要求、运行费用最低的配电网系统规划模型。约束条件：在保证供电可靠性和网损约束的前提下，充分考虑分布式电源容量系数。根据分布式电源最优出力方式和运行曲线，在保证可靠性目标和网损最小的前提下，根据分布式电源特性和经济性指标确定发电容量、负荷方式、出力方式等运行参数。投资成本：在保证可靠性要求基础上，在满足综合成本最小的前提下，确定分布式电源装机总投资。根据上述目标函数得到各决策变量值和参数值，将各变量值作为决策变量。根据双层规划模型求解得出上层规划结果。在下层优化问题中，以配电系统运行经济性和可靠性为基础，结合最优控制理论，求解最优配电方式选择及最优网架结构组合。针对得到的目标函数，设定求解过程中的约束条件，约束条件包括变量约束和状态变量约束，表示为：

$$\begin{cases} P_{DG,i}-P_{L,i}=V_i\sum_{m=1}^{N}\theta_m\left(G_{im}\cos\zeta_m\right) \\ Q_{DG,i}-Q_{L,i}=V_i\sum_{j=m}^{N}\theta_m\left(G_{im}\sin\zeta_m\right) \\ 0\le P_{DG,i}\le P_{DG,i}^{\max} \\ 0\le Q_{DG,i}\le Q_{DG,i}^{\max} \\ V_i^{\min}\le V_i\le V_i^{\max} \\ 0\le I_i\le I_i^{\max} \end{cases} \tag{6}$$

式中，$P_{DG,i}$、$Q_{DG,i}$分别为某节点处的有功功率和有功负荷，$P_{L,i}$、$Q_{L,i}$则表示某节点处的无功功率和无功负荷，G_{im}表示节点与导线之间的电导，V_i表示电纳，θ_m表示相角差。

在以上的约束条件下，首先确定影响决策变量的主要因素。主动配网规划目标函数最重要的影响因素为网损水平和电压偏差，对最优目标函数进行求导，可得以上两个约束指标最优值。最终根据配电网的模拟运行情况，得到最优的规划方法。

2 算例分析

2.1 算例说明

为了验证本文设计的大数据接入下的主动配电网双层定性规划方法的有效性，在本章的算例分析中，以城市中常用的10 kV配电网作为实例，对本文方法进行验证分析。算例主动配电网的结构如下图所示：

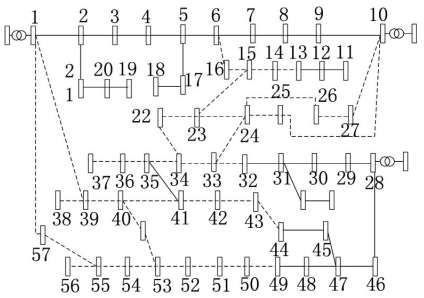


图1 算例结构示意图

图1中，实线连接表示为目前已有的线路，虚线连接表示计划可选的新建线路。其中包括5个变电站，规格为35/10 kV且容量为2×16 MVA，其中节点1、10、28为电源节点，在待规划区域内，已经有的负荷节点为32个，计划增加的负荷节点为16个，确定的新增分布式电源共有10个接入。为了在性能测试过程中减少计算量，需要对算例进行简化，对其中的线路进行统一处理。算例中的阻抗参数设定为0.003 6+0.000 4jΩ/km，主动配电网算例中的部分主要节点位置信息和最大负荷情况如表1所示。

表1 算例配电网节点信息

线路编号	首节点	末节点	线路阻抗/Ω
A	1	2	0.003 0+0.001 2i
B	2	3	0.005 0+0.001 2i
C	3	4	0.004 5+0.000 2i
D	4	5	0.007 0+0.001 2i
E	5	6	0.005 3+0.003 3i
F	6	7	0.003 6+0.001 2i
G	7	8	0.002 2+0.001 2i
H	9	10	0.005 4+0.000 7i
I	11	12	0.007 4+0.002 5i
J	15	16	0.005 0+0.001 2i
K	28	29	0.003 4+0.002 1i
L	35	41	0.002 2+0.001 2i
M	45	47	0.005 1+0.001 2i
N	55	57	0.007 0+0.001 2i

在整个双层规划方法的参数设置过程中，规划层中设定迭代过程中的种群数量为20，迭代次数为200次，运行层中的粒子群规模为40，迭代次数为100。该算例主动配电网中，所有的工程总周期为10年，线路建设成本为15万元/km，网损每千瓦时的成本是0.4元，弃光每千瓦时的成本是0.3元，光伏发电补贴每千瓦时的成本是0.7元，网购电成本每千瓦时的成本是0.31元。本文主动配电网算例中的分布式电源为光伏电源，参考算例当地一年四季的典型日负荷变化曲线和日光伏出力曲线，将其进行分段化简，以减少计算量。在以上的算例要求下，分别使用本文设计的双层定性规划方法和改进杜鹃算法的规划方法、单一信息数据双层规划方法共同进行测试，并

将测试结果进行对比与分析。

2.2 实验结果对比与分析

对比三种不同规划方法下得到的不同扩建线路、开关位置，以及根据不同规划方案下的总造价，得到的不同规划方法的结果如表2所示。

表2 三种规划方案比较

方案成本比较	本文方案	改进杜鹃算法的规划方法	单一信息数据双层规划方法
扩建线路	4-56,15-36,10-51, 45-26,18-31,6-11, 25-19,12-31,42-49,	41-51,5-26,15-32,46-24, 55-15,22-41,24-52, 34-16,27-44,21-52,	12-55,36-56,25-15, 46-14,51-56,36-26, 12-14,54-51,21-29
新增开关位置	25-46,14-51,56-25, 36-20,23-25,15-56, 8-48,45-16,41-11,	51-36,41-56,15-56, 23-46,15-35,47-51, 52-12,51-25,	41-28,54-56,35-26, 45-21,21-25,45-48, 23-41,43-15,
总造价/万元	11 536.56	11 498.36	11 861.55

配电网的主动管理模式下，网损和电压偏差是描述规划效果最重要的两个指标。在以上的规划方法下，对比不同季节下，不同规划方法下的网络损耗，如图2所示。

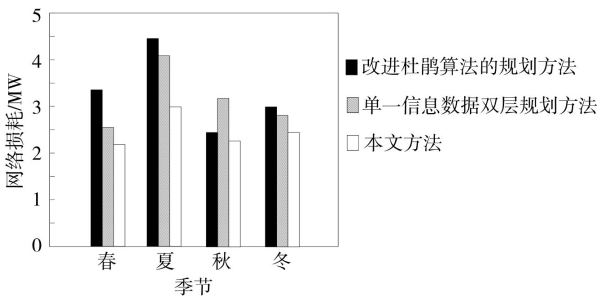


图2 不同规划方法下不同季节网络损耗

从图2可以看出，在不同的季节中，主动配电网中使用本文规划方法下的网损最低，其中夏季的网络损耗量最大，主要是由于夏季负荷大所导致的。

对比不同规划方法下的电压偏差，结果如图3所示。

从图3中不同规划方法的对比下可以看出，不同季节下主动配电网中在不同的规划方法下，两种传统的规划方法下的电压偏差都高于本文规划方法。

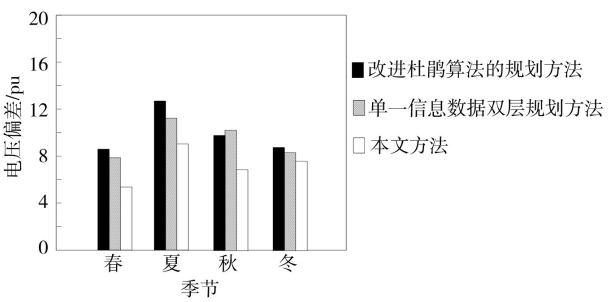


图3 不同规划方法下不同季节电压偏差

综上所述，本文所设计大数据接入下的主动配电网双层规划方法在实际应用中具有一定的有效性。

3 结束语

随着大数据技术的发展，基于数据分析的主动配网规划越来越受到人们关注，其规划方式也逐渐从定性分析向定量分析转变。本文基于大数据接入下研究了主动配电网络，通过对双层规划模型进行建模，实现了下层对上层的动态迭代求解。上层规划以最大供电可靠性为目标。采用双层规划模型的规划方法可以较好地解决配电网中时序导致的负荷变化影响问题。由于考虑到不同用户属性、场景和约束条件，本文所提出方法在大数据技术下，适用于主动配电网中不同负荷类型的求解策略，本文研究成果对智能配电网建设具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 马瑞，罗心仪，肖麟祥.基于随机模糊机会约束的主动配电网分布式风电双层规划模型[J].电力科学与技术学报，2021，36(3)：46−55.

[2] 张忠会，雷大勇，李俊，等.基于自适应ε−支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源−网−荷−储双层协同规划模型[J].电网技术，2022，46(6)：2199−2212.

[3] 杨东俊，涂智福，徐敬友，等.计及低碳排放和需求侧管理的主动配电网双层规划[J].武汉大学学报(工学版)，2022，55(7)：709−715.

[4] 何晨可，朱继忠，刘云，等.计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J].电工技术学报，2022，37(1)：92−111.

[5] 李咸善，马凯琳，程杉.含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略[J].电力系统保护与控制，2022，50(1)：8−22.

[6] 李婧祺，王丹，樊华，等.含移动式储能的主动配电网分层优化控制方法[J].电力系统自动化，2022，46(10)：189−198.

[7] 程骏，闻枫，赵文翰，等.考虑储能管理并计及源−荷不确定性的主动配电网运行风险评估方法[J].武汉大学学报(工学版)，2021，54(12)：1150−1158.

[8] 李佳蓉，林今，邢学韬，等.主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J].中国电机工程学报，2021，41(12)：4021−4033.

[9] 李振坤，王艺龙，季亮，等.基于虚拟变电站的配电网薄弱区域集群双层规划研究[J].电力建设，2022，43(8)：53−65.

[10] 杨博，王俊婷，俞磊，等.基于孔雀优化算法的配电网储能系统双层多目标优化配置[J].上海交通大学学报，2022，56(10)：1294−1307.

[11] 翟旭京，田寿涛，安琪，等.基于饱和负荷预测的增量配电网自动化协调控制技术[J].自动化技术与应用，2022，41(3)：123−127.

[12] 李勤超，高久国，余畅，等.配电网停运风险自动化防控技术研究[J].自动化技术与应用，2022，41(4)：159−162.

作者简介：黄存强(1992−)，男，本科，工程师，研究方向：电网规划。