

[分布式发电]

基于WOA算法的新能源 分布式发电配电网故障检测

文/刘金虎 李运红 黄鑫 王磊 张怡玲
国网神农架供电公司

分布式发电（DG）以清洁能源作为供应接入配电网中，但DG的大量渗透使得电力系统结构复杂化。针对含有DG的配电网中故障识别问题，提出在初始种群和收敛方式两方面的改进鲸鱼优化算法（Whale Optimization Algorithm, WOA）模型并进行求解。在MATLAB上搭建了33节点配电网进行仿真实验，结果表明改进鲸鱼优化算法求解速度快、迭代次数少、准确率达96%，能快速准确地定位故障。

清洁能源的发电规模受自然环境因素影响较大，发电的规模相比传统的火电厂和水电厂小。由于电能不能大量储存的特点，分布式电源的接入点常常选在小规模的配电网中，为就近的负荷供电。当DG并网后，电网的可用电源容量增加，有利于改善当前紧张的用电形势。在风能和太阳能发达的西北偏远地区，DG可以直接接在用户侧供电，减少了网损和配电成本^[1]。由于DG相互独立，调节相对灵活，在主电网发生故障时依旧可以孤岛的方式继续运行，给失电负荷供电。DG为主体构建以风光为主要动力来源的微电网系统，给电网发生故障后的恢复问题带来了新的解决方式。

分布式电源接入配电网后给配电网的结构带来较大影响，使原电网的结构变得更为复杂，电网中的潮流改变^[2]。由于分布式发电间歇性、波动性和不确定性的发电特性，通常不能将新能源发电机直接与配电网相连，以免造成电压波动较大。储能技术的发展改变了电能需要即发即用的模式，储能装置利用新能源具有的时空互补性起到削峰填谷的作用，减小弃风弃电的概率，使新能源的利用率最大化^[3]。

多位学者对配电网故障进行研究，文献[4]利用

FTU和配电站告警信息的不同特征，动态生成反映故障信息和告警信息的关联矩阵，根据此矩阵构造新的开关函数，在避免复杂逻辑运算的基础上将两种信息融合得到最终的故障定位结果。文献[5]提出一种基于分布式相量测量单元（D-PMU）和Petri网的配电网故障诊断方法。该方法耦合预判形成的故障可疑元件库和故障诊断模型，简化网络分析过程，提高故障诊断速度。文献[6]将改进的ROMP算法与加权贝叶斯网络相结合，使用算法求解电压欠定方程来确定疑似故障范围，然后使用加权贝叶斯网络评价元件故障概率，对网络中各节点基于权重进行赋值，削弱误报信息的影响；采用证据理论融合不同证据体得到最终诊断结果。

本文提出一种改进鲸鱼算法提高配电网故障定位准确度，主要在初始种群和收敛方式两方面进行改进。

分布式电源接入配电网存在的问题

随着分布式电源的大量接入，传统的配电网结构和形态都发生了很大的变化，给配电网带来一些不利的影响，如潮流方向变得不确定，电压的稳定性遭到了不同程度的破坏。不同类型的分布式电源

接入系统后带来的配电网网损和电压波动的影响不尽相同。

目前最常见的风力发电和光伏发电接入电网时的交直流变换让原来的配电网中接入更多的电力电子器件，给电网的潮流带来不利影响。此外，DG非计划性的孤岛运行状态给电网的安全稳定运行带来严重影响。作为连接发电端与用户端的连接网，配电网的安全可靠运行是整个电网可靠运行的关键环节，其近些年成为关注的焦点。在配电网发生故障时，快速准确的定位故障位置是清除故障的前提。

在分布式电源并未大量并入配电网时，使用传统的定位方式来找出故障点，根据电网中电流的方向可以直接判断。当检测到的电流方向是从线路流向母线时，可以判断故障区域。分布式电源大量接入后，配电网中的电流流向不再单一，为此需要提出一种更加快速有效的定位方法，在出现异常运行状态时迅速准确定位并跳开故障区段两侧保护装置，隔离故障，为后续的检修及故障恢复提供良好的基础。

分布式电源接入配电网在供电可靠性、电网防灾水平、供电经济性、节能和环保等方面存在积极作用。但可能引起继电保护装置误动或拒动，对配电网产生不确定影响，对DG在配电网中的分布要协调不同类型电源。对于本文所研究问题，DG接入配电网增加了配电网故障的定位难度。

含DG配电网潮流计算模型和算例分析

1. 基于改进节点分层的前推回代潮流计算模型

由于DG的种类不同，处理方式和建模方式也不同，对系统进行潮流计算时可以分为PQ、PV、PI以及PQ(V)节点四种类型。对不同类型的并网DG分类，都转换为PQ节点来进行潮流计算。计算流程如图1所示。

本文利用图论知识将配电网模型分解成多个以电源点为树根的树形辐射网络，简化为图所示的拓扑结构，通过深度优先搜索算法对图进行遍历并且编号，网络简化后进行前推回代潮流计算。改进的前推后潮流计算方法快速对配电网编号，配电网无需复杂编号，降低计算复杂度，简化计算过程，缩短潮流计算时间，为后续研究提供理论基础。

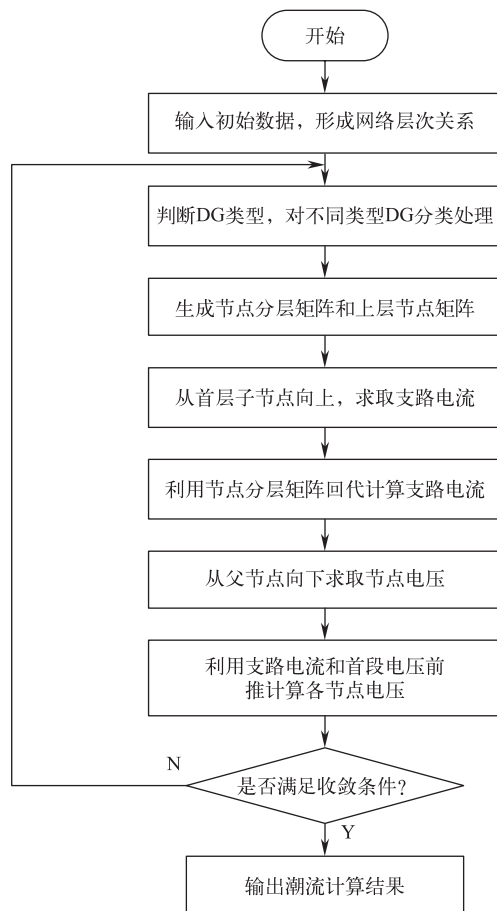


图1 含DG配电网的前推回代潮流计算流程

2. 算例分析

配电网模型如图2所示。33节点标准测试系统来验证潮流计算模型的有效性，针对DG接入的不同节点以及不同容量在MATLAB中进行仿真分析。

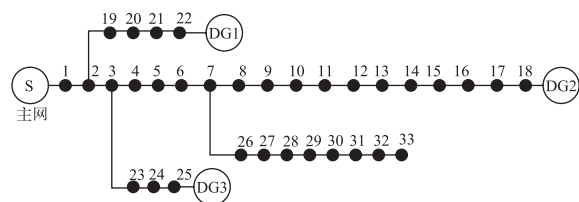


图2 IEEE33节点配电网模型

将接入配电网的DG类型设置为PQ型节点，分别接入节点1、节点7、节点18、节点23和节点26，设置DG的容量为 $p=1\ 000\ \text{kW}$ ， $q=500\ \text{KVar}$ ；设置收敛准确度为 1×10^{-5} 。图3为该模型仿真结果。当有DG接入时，不论接入点的位置如何，都能使整体的节点电压得到提高，且接入点位置与主电源点相距越远，对整体节点电压的提升作用越大。

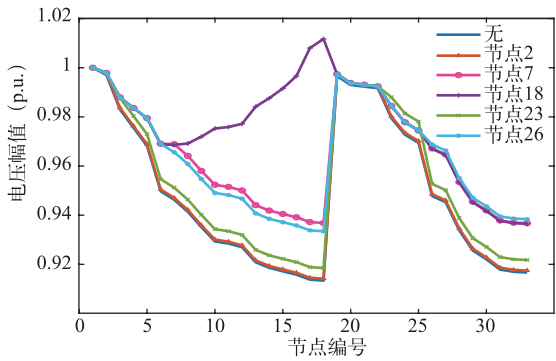


图3 不同节点接入DG电压变化

节点电压变化如图4所示，配电网中电压幅值随着DG接入容量的增加而增加，成正比关系。由此可见，DG的接入对配电网有着积极影响。但是在实际使用过程中，DG的容量受到外界条件的限制，并且随着DG容量的增大，配电网中接入更多的电力电子器件，给配电网带来更严重的谐波影响。所以，并不能为了减小配电网的网损和提高电压幅值而使并入配电网的DG容量越大越好。配电网中电压幅值随着DG接入容量的增加而增加，成正比关系，网损随接入容量的增加而减小。

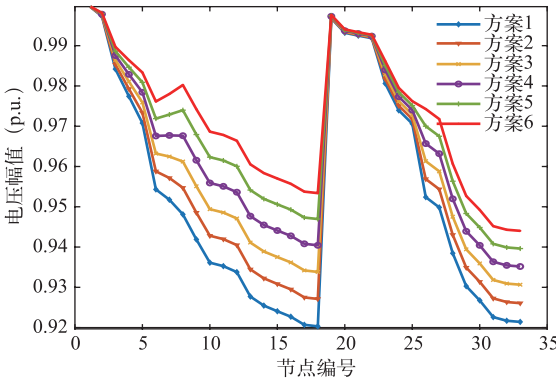
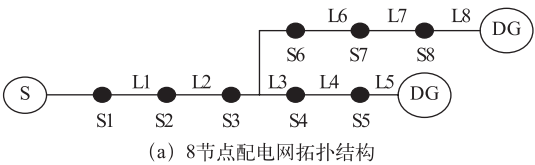


图4 不同容量的DG并网后的节点电压变化

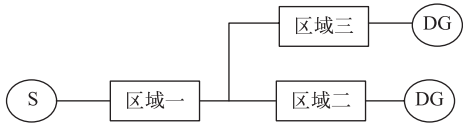
基于改进鲸鱼优化算法的配电网故障定位

1. 故障定位模型及有效性验证

图5a为配电网拓扑结构。此时DG1和DG2并网运行，当区段L4、L6发生故障时，根据对故障电流的编码方式，此时，各开关的电流信息为 $I_j=[1\ 1\ 1\ -1\ -1\ 1\ -1\ -1]$ ，各个区段的状态值为 $[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0]$ 。此时各个开关的上下半区馈线区段信息见表1。图5b为配电网模型，说明函数构造的合理性以及层级划分的有效性。



(a) 8节点配电网拓扑结构



(b) 8节点含DG配电网层级模型

表1 8节点配电网开关区段分类

开关	到上半区电源之间的区段	到下半区电源之间的区段	上半区所有区段	下半区所有区段
S1	无	L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8	无	L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8
S2	L1	L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8	L1	L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8
S3	L1、L2	L3、L4、L5	L1、L2	L3、L4、L5、L6、L7、L8
S4	L1、L2、L3	L4、L5	L1、L2、L3	L4、L5
S5	L1、L2、L3、L4	L5	L1、L2、L3、L4、L6、L7、L8	L5
S6	L1、L2	L6、L7、L8	L1、L2	L3、L4、L5、L6、L7、L8
S7	L1、L2、L6	L7、L8	L1、L2、L6	L7、L8
S8	L1、L2、L6、L7	L8	L1、L2、L6、L7	L8

对每个开关节点的函数值计算可以看出，当一个区域内的馈线区段发生故障时，不管故障发生的位置和故障数量，对此区域外的其他区域无影响。因此，可以将每个区域对外等效为一个二端口网络，根据端口可以建立简化模型，在故障定位时只需要在馈线终端（FUT）上传的故障信息提取出端口的信息进行运算就可以定位出故障发生的区域，有效降低故障信息处理和计算的维度。

2. 基于改进鲸鱼优化算法的故障定位

WOA的数学模型由多个主要部分组成：游走搜索猎物、收缩包围猎物和螺旋捕食猎物。但是鲸鱼算法仍然存在问题，为提高鲸鱼优化算法的收敛准确度，本文采用如下策略对其进行改进。

分为初始种群优化和迭代方式两个方向。初始

种群优化为得到多样性更加丰富的初始种群,采用sobol序列来生成更加均匀的初始种群,能够更加全面地覆盖搜索空间的范围。由于初始种群的质量直接决定算法后续迭代的收敛性,因此在采用sobol序列生成初始种群后,可以引入精英反向学习策略来筛选出更优值的种群。通过筛选,舍弃掉适应度较差的个体后得到的种群称为精英种群,其收敛速度和准确度在初始种群的基础上得到大幅度的提升。迭代方式会出现在捕食后期收敛速度慢的问题,为了使鲸鱼种群在捕食后期具有更好的局部收敛能力,提出一种自适应收敛因子,如式(1),取 $\mu=1/2$ 、 $\varphi=0$ 。使用此收敛因子可以使算法初期的 a 值较大,减小速度较慢,得到更好的全局搜索能力。在算法后期 a 值递减速度慢,提高了收敛准确度。即

$$a = 2 - 2 \sin \left(\mu \frac{t}{T} \pi + \varphi \right) \quad (1)$$

随着算法迭代, 鲸鱼的位置更新公式并没有随之变化, 可能导致鲸鱼在捕食后期偏离猎物陷入局部寻优的结果, 因此提出自适应权值来更新鲸鱼的位置。使用自适应权重对式 (2) 鲸鱼的位置进行改进, 得到式 (3) 代替原来的位置更新公式。

$$\omega = 1 - \frac{e^{\frac{t}{T}} - 1}{e - 1} \quad (2)$$

$$X(t+1) = \omega X^*(t) - A \times D \quad (3)$$

在使用IWOA算法对配电网故障位置求解时，适应度函数的值即为鲸鱼个体的位置，求解的具体流程如图6所示。

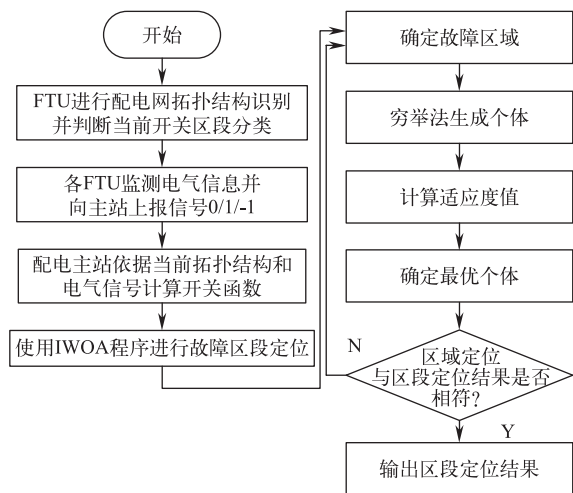


图6 配电网故障定位流程图

算例分析

本文采用如图2所示的含分布式电源的配电网进行仿真实验。此配电网接入3个分布式电源DG1、DG2、DG3。图2中S1~S33为分段开关,编号1~33为馈线区段。根据上文分析将此配电网划分为七个区域,建立分层模型,分层模型如图7所示。

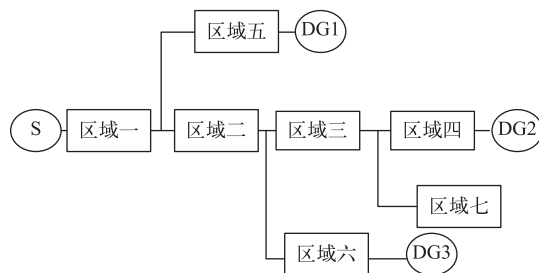


图7 33节点配电网层级模型图

由IWOA算法, 设置参数: 种群规模 $G=30$, 最大迭代次数 $M=100$ 。当DG1、DG2、DG3均投入运行时, 假设图中区域七发生单点故障时, FTU上传的故障信息是[1 1 1 1 1 1 1 -1 -1 -1-1 -1 -1 -1-1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 0 0 0 0], 提取出每个区域的故障电流的信息是[1 1 1 1 -1 -1 0]。将提取出的区域故障电流信息运用改进鲸鱼算法进行求解, 得到的结果是[0 0 0 1 0 0 0], 由此可以判断出故障所在地为区域四。再对区域四中所包含的区段进行计算, 得到区域四中的状态结果为[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0], 所得结果与假定故障位置相符合。

当发生多点故障时,假定故障区段为19和24,此时从FTU上传的故障信息提取出区域故障信息为[1 1 0 -1 1 1 0],运用IWOA求解得到区域定位结果为[0 0 0 0 1 1 0],再对区域五、六内的所有区段进行状态值计算,所得结果为[1 0 0 0]、[0 1 0 0],计算结果与假设故障点一致。

粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)是解决非线性整数优化问题的经典有效方法,使用上述两种算法设置相同的参数做对比实验。以上述配电网模型为例,采用IWOA算法和PSO算法在相同的参数下进行结果对比。对PSO算法和GA算法的初始设置为:初始种群数为30,最大迭代次数为100,进行相同的故障仿真。图8为使用IWOA算法与粒子群算法以及遗传算法来计算配电网发生单点故障的仿真对比图。从图8中可以看出,IWOA在收敛速度和迭代次数方面均优于其他两种算法,IWOA算法陷入

局部寻优的次数也要少于其他两种算法。

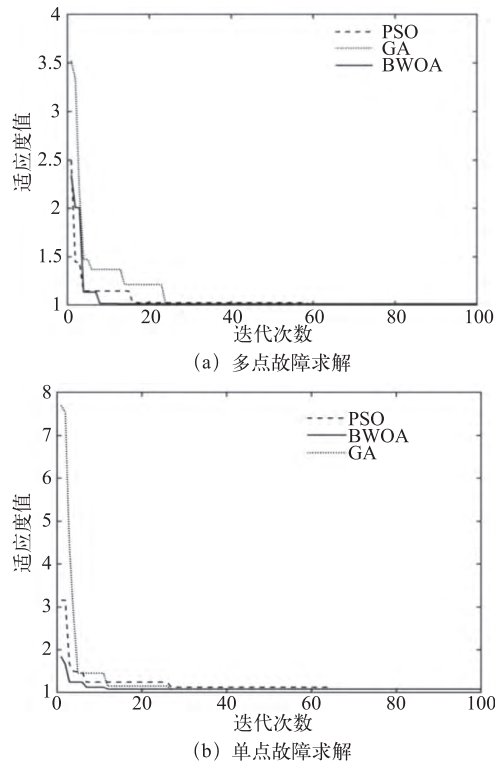


图8 各类故障算法应用对比

将三种算法运行50次并对比其各种性能，得到的结果见表2。通过对比可以看出优化鲸鱼算法在平均迭代次数、准确率以及平均耗时方面均具有明显的优势，满足在故障定位方面所需要的准确、快速的要求。

表2 各算法仿真准确度对比

算法	平均迭代次数	准确率 (%)	平均耗时/ms
IWOA	12	96	14.2
PSO	18	84	43.57
GA	40	70	76.52

结束语

本文针对含DG的配电网故障定位问题，给出一种基于鲸鱼优化算法的故障定位的新方法，对故障信息进行编码并对配电网拓扑结构进行分层处理，通过对故障分层定位与具体定位的结果对比验证故障定位的准确性。对含DG的IEEE33节点配电系统进行仿真，运用改进后的鲸鱼算法快速有效，对复杂配电网故障定位的准确性和快速性提供了保障。EA

(收稿日期：2024-02-20)

参考文献

[1] 刘志宏，赵杰行，薛鹏飞，等．面向偏远地区供电可靠性提升的配网储能电站机会约束规划方法[J]．电网与清洁能源，2021，37(8)：128-138．

[2] 齐先军，周沐聪，张晶晶，韩平平．高分辨率DG预测数据下基于节点拓扑相关度的配电网多目标重构[J]．南方电网技术，2021，15(9)：16-23．

[3] 陈灿．含分布式电源的配电网故障定位研究[D]．南京：广西大学，2017．

[4] 郭上华王钢．融合FTU和配变告警信息的有源配网故障定位方法[J]．电力系统保护与控制，2022，50(22)：92-99．

[5] KONG X, XIAO F, LU W, et al. Distribution network fault diagnosis method for the deep integration of cyber-physics[J]. Electric Power Systems Research, 2023(214): 1-8.

[7] 赵维兴，熊楠，宁楠，等．基于多源信息融合的电网友层智能故障诊断方法[J]．南方电网技术，2021，15(9)：7．

