

DOI: 10.7667/PSPC171016

基于 MOPSO 的含分布式光伏配电网故障区段定位

吴凡¹, 赵晋泉¹, 朱斌², 吴海伟², 苏大威²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 光伏等分布式电源接入配电网, 影响故障电流的分布, 导致传统配网故障区段定位方法不再适用, 对此提出基于 MOPSO 的含分布式光伏电源配电网故障区段定位方法。针对配网发生单相接地故障情形, 基于故障暂态分量确定终端状态的编码。考虑在不同光照强度下光伏电源提供的故障电流特性, 构建满足光伏电源动态投切的开关函数。针对使用单目标优化智能算法易造成不收敛, 以及 NSGA-II 计算复杂度较高的问题, 提出采用多目标粒子群算法(MOPSO)定位故障区段。该算法避免了对权值的选取, 且计算复杂度低。算例分析表明所提方法能实现含光伏配电网发生单一和多重故障的区段定位, 且对畸变信息具有一定的容错性。

关键词: 配电网; 分布式光伏; 故障区段定位; 多目标粒子群算法; 开关函数

Faulty section location based on MOPSO for distribution networks with distributed photovoltaic generation

WU Fan¹, ZHAO Jinquan¹, ZHU Bin², WU Haiwei², SU Dawei²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The faulty section location methods for traditional distribution networks are no longer applicable for distribution networks with Distributed Generations (DGs) such as photovoltaic (PV) generations which influences the distribution of fault current. A faulty section location method based on MOPSO for distribution networks with DGs is proposed. Terminal state encoding based on fault transient component is determined aiming at single phase grounding fault occurred in distribution networks. The influence of fault current characteristics of PV generations under different light intensity is taken into account and switch function for dynamic switching of PV generations is proposed. Since the single objective optimization intelligence algorithms easily cause the non-convergence and the computational complexity of NSGA-II is high, the Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) method is used to solve the proposed problems. The difficulty of determination of the weights is avoided in MOPSO and the computation complexity is low. The simulation results show that the proposed method can achieve the single and multiple faulty section location in distribution networks with PVs, and is fault-tolerant to distortion information.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Technologies and Their Applications of Development Mode and Auxiliary Analysis of Dispatch-Control Integration System for Distribution Network, and National Natural Science Foundation of China (No. 51577049).

Key words: distribution networks; distributed photovoltaic; faulty section location; MOPSO; switch function

0 引言

智能配电网自愈控制是实现配电网在不同运行

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0902600); 国家电网公司总部科技项目: 配电网调控一体化系统建设模式与辅助分析关键技术研究及深化应用; 国家自然科学基金项目(51577049)

状态下安全、可靠与经济运行的核心技术, 是目前电力系统领域的研究热点^[1]。快速故障定位作为配电网自愈控制技术中故障处理最基本的环节, 是保证配电网安全可靠运行的前提。在基于馈线监控终端(FTU)的集中智能配电系统^[2]下, 故障定位的快速性和准确性直接影响了包括故障恢复供电等配电网的自愈能力, 从而影响供电质量。近年来, 随着清洁、可再生的分布式光伏电源(PV)的接入, 使得配

网从单电源辐射状网变为功率双向流动的复杂多电源网络, 配电网的结构和潮流等也因此发生变化。传统配网发生故障时仅由主电源提供单向流动的故障电流, 而含光伏配网的故障电流是双向流动的, 且在不同光照强度下的光伏电源向故障点提供的故障电流有所不同^[3], 从而使传统配网的故障定位方法无法定位接入光伏配网的故障区段。

目前, 许多相关研究^[4-8]将基于 FTU 的配电网故障区段定位问题转换为优化问题, 并用智能算法进行求解。关于含 DG 配电网故障区段定位方法也有相应的研究。文献[9-11]考虑 DG 接入后的短路故障电流特性, 确定了馈线开关状态信息的编码, 提出采用普通智能算法定位含 DG 复杂配电网的故障区段, 但当故障数增多或故障信息发生畸变时容易出现“未成熟收敛”现象。文献[12]提出的基于混合智能算法的配电网故障定位方法, 考虑风电机组并入配网完善了开关函数模型, 但并没有分析风电机组不同出力下故障电流特性对开关函数的影响, 仍笼统将其考虑成确定出力 DG 构建开关函数。

上述研究仍将定位问题通过加权方式转化成单目标优化问题进行求解, 所以单目标优化智能算法对权重值较为敏感的问题并没有得到解决。文献[13]提出配网故障定位的多目标优化模型, 采用的基于快速分类的非支配遗传算法(NSGA-II)进行求解, 虽然具有较高的准确性和容错性, 但不适用于含 DG 配电网故障定位, 且由于该算法存在选择、交叉等遗传操作, 计算复杂度较高, 导致故障区段定位的快速性较低。另外, 目前关于配网故障区段的研究基本上是针对相间短路故障情形, 提供的故障电流能满足基于 FTU 定位的要求。但由于我国中压配电网多采用中性点小电流接地方式, 发生单相接地故障较多, 其故障电流不明显, 需要进行小波变换处理后基于暂态零序分量进行故障区段定位^[14]。

通过分析含 DG 配网发生单相接地故障和相间短路故障时的故障电流特性, 本文确定了不同故障类型下 FTU 上传开关状态信息的编码。考虑不同光照强度对并入配网的光伏电源影响, 对开关函数进行改进。针对单目标优化智能算法对权重值敏感以及 NSGA-II 计算复杂度高的问题, 本文提出一种基于多目标粒子群算法^[15](MOPSO)的定位方法, 对含光伏配网的多目标故障区段定位模型进行优化计算, 快速和准确地定位出故障区段。

1 含光伏配网故障区段定位的多目标数学模型

1.1 开关状态编码

光伏通过变流器并入配网, 属于变流器类 DG,

其提供的短路电流一般为额定电流的 1.2~1.5 倍左右^[16]。若不考虑供电路径长短等因素对光伏输出短路电流的影响, 理论上可以设定能区分短路电流与工作电流的 FTU 上报阈值。因此当含光伏配网发生相间短路故障时, FTU 可检测到由主电源和光伏电源向故障点提供高于整定值的短路故障电流。如图 1 中区段 x_3 发生故障, 实线箭头代表短路电流流向。通过假定主电源到馈线的方向为网络正方向^[5], 基于假定网络正方向和故障电流的流向关系, 确定开关处 FTU 检测过流信号的编码:

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{故障电流方向与正方向一致} \\ 0 & \text{检测不到故障电流} \\ -1 & \text{故障电流方向与正方向相反} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_j 为第 j 个分段开关状态编码。

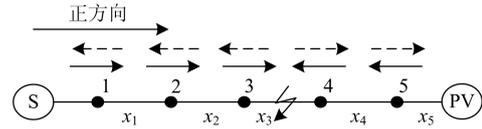


图 1 含光伏的简单配电网网络

Fig. 1 Simple distribution network with PV

配电网发生单相接地故障时的稳态故障电流不明显, FTU 无法直接检测稳态故障电流信息确定上述编码。但单相接地故障发生瞬间会产生零序突变变量, 且 FTU 具有检测小电流接地系统发生单相接地故障产生的零序电流的功能^[17]。由于含 DG 配电网发生单相接地故障只影响了电容电流的分布, 对零序电流影响很小, 不影响 FTU 对零序电流的检测, 因此可基于零序分量对含 DG 配电网的开关状态编码^[14]。先通过小波变换对故障信号进行滤波处理, 获得易辨识的暂态零序电流的方向和数值, 如图 1 中虚线箭头代表零序电流流向, 之后与 FTU 整定的零序电流上报阈值比较。本文根据配电网发生单相接地故障时的零序电流方向与故障电流方向相反的原则确定开关状态编码, 即当零序电流方向与网络正方向相反时开关状态为 -1, 若相同时为 1。

由于上述确定的配网发生短路故障和单相接地故障的开关状态编码相似, 因此为方便分析, 下文讨论故障区段定位时的开关状态指的是配网馈线发生短路故障下的编码值。

1.2 开关函数

实现配网故障区段定位, 需要构建一个反映各分段开关故障电流越限与故障区段关联关系的函数, 即为开关函数。对于单电源供电的配网, 其表达式如式(2)所示。

$$I_j^*(x) = \prod_{i=1}^{N_j} x_{j,i} \quad (2)$$

式中： $I_j^*(x)$ 为第 j 个分段开关的开关函数，只存在两种情况编码，0 为正常，1 为检测到故障电流；假定第 j 个开关到系统主电源线路为上游线路，其与线路末端的线路为下游线路， N_j 为开关 j 下游线路馈线区段总数； $x_{j,i}$ 为开关 j 下游第 i 个馈线区段状态值，0 为正常状态，1 为故障状态；“ Π ” 为逻辑或运算。

对于含光伏等 DG 的多电源配电网式(2)不再适用。假定整定的 FTU 上报阈值小于光伏电源向故障点提供的故障电流数值，即 FTU 能够检测到光伏电源到故障点的故障路径上流过各分段开关的故障电流。当含光伏配网发生故障时，由于受自然条件变化的影响，不同的光照强度会造成光伏电源出力的不同，从而导致配网发生故障时向故障点提供的故障电流不同。若光照强度较高，光伏电源输出的故障电流能满足 FTU 设定上报阈值的要求，从而根据开关状态编码确定光伏接入时的开关状态信息，并构建满足光伏电源动态投切的开关函数^[10]；但当光照强度较小时，其提供的故障电流会显著减少^[3]，可能无法达到 FTU 设定的上报阈值，光伏电源输出的故障电流被屏蔽。此时便不能将接入的光伏电源考虑进开关函数中。

考虑光伏电源不同出力的故障电流特性，本文在文献[9]开关函数的基础上，通过增加反映光照强度影响光伏电源提供故障电流是否被 FTU 屏蔽的系数对开关函数进行改进，建立新的开关函数如式(3)所示。

$$I_j^*(x) = \left[\prod_{i_{up}=1}^{N_{j,up}} S_{i_{up}} \cdot K_{i_{up}} \cdot \left(1 - \prod_{i_1=1}^{N_{j,i_{up}}} x_{j,i_{up},i_1} \right) \right] \cdot \prod_{i_{down}=1}^{N_{j,down}} x_{j,i_{down}} - \left[\prod_{i_{down}=1}^{N_{j,down}} S_{i_{down}} \cdot K_{i_{down}} \cdot \left(1 - \prod_{i_2=1}^{N_{j,i_{down}}} x_{j,i_{down},i_2} \right) \right] \cdot \prod_{i_{up}=1}^{N_{j,up}} x_{j,i_{up}} \quad (3)$$

式中：以第 j 个分段开关为分界点，将配电路径分成开关到主电源的上游线路和开关到线路末端的下游线路， $N_{j,up}$ 、 $N_{j,down}$ 分别为上、下游线路电源个数； x_{j,i_{up},i_1} 、 x_{j,i_{down},i_2} 分别为从第 j 个开关到上游线路的第 i_{up} 个电源路径上经过的第 i_1 、下游线路的第 i_{down} 个电源路径上经过的第 i_2 个馈线区段状态值； $N_{j,i_{up}}$ 、 $N_{j,i_{down}}$ 分别为第 j 个开关到上游线路第 i_{up} 、下游线路的第 i_{down} 个电源的区段数； $x_{j,i_{up}}$ 、 $x_{j,i_{down}}$ 分

别为第 j 个开关划分的上游线路第 i_{up} 、下游线路第 i_{down} 个区段状态值； $N_{j,up}$ 、 $N_{j,down}$ 分别为第 j 个开关上、下游线路的区段数； $K_{i_{up}}$ 、 $K_{i_{down}}$ 分别为上游线路的第 i_{up} 、下游线路的第 i_{down} 个光伏电源开关系数，若接入则取 1，否则为 0； $S_{i_{up}}$ 、 $S_{i_{down}}$ 分别为上游线路第 i_{up} 、下游线路第 i_{down} 个电源提供故障电流被屏蔽的系数，光伏电源在较高光照强度下输出高于阈值的故障电流则对应屏蔽系数为 1，否则为 0，对于上游线路系统电源的屏蔽系数为 1。

若配电网中第 j 个开关的上游线路存在系统电源 S 和一个光伏 PV1；下游线路存在一个光伏 PV2，此时对应的开关系数和屏蔽系数为 $K_S = K_{PV1} = K_{PV2} = 1$ ， $S_S = S_{PV1} = S_{PV2} = 1$ 。根据式(3)，此时的开关函数为

$$I_j^*(x) = \left(1 - \prod_{i_1=1}^{N_{j,S}} x_{j,S,i_1} \right) \left| \left(1 - \prod_{i_1=1}^{N_{j,PV1}} x_{j,PV1,i_1} \right) \cdot \prod_{i_{down}=1}^{N_{j,down}} x_{j,i_{down}} - \left(1 - \prod_{i_2=1}^{N_{j,PV2}} x_{j,PV2,i_2} \right) \cdot \prod_{i_{up}=1}^{N_{j,up}} x_{j,i_{up}} \right. \quad (4)$$

根据式(4)，当第 j 个开关的上游某区段发生故障时，可得 $I_j^*(x) = -1$ ；当第 j 个开关的下游某区段发生故障， $I_j^*(x) = 1$ ；当第 j 个开关的上下游都有区段发生故障时，若上游故障区段没有阻隔任一上游电源向下游故障区段输出故障电流， $I_j^*(x) = 1$ ，否则 $I_j^*(x) = 0$ 。由此可见改进开关函数能准确求得发生单重和多重故障时分段开关的状态。

若 PV2 接入处的光照强度较低，导致其出力较小，提供的故障电流被屏蔽，因此 $S_{PV2} = 0$ 。式(4)变为

$$I_j^*(x) = \left(1 - \prod_{i_1=1}^{N_{j,S}} x_{j,S,i_1} \right) \left| \left(1 - \prod_{i_2=1}^{N_{j,PV1}} x_{j,PV1,i_2} \right) \cdot \prod_{i_{down}=1}^{N_{j,down}} x_{j,i_{down}} \right. \quad (5)$$

第 j 个开关的上游某区段发生故障时的 $I_j^*(x) = 0$ ，下游某区段发生故障时的 $I_j^*(x) = 1$ 。以上计算结果与 FTU 上传故障信息一致，因此改进的开关函数适用于不同光照强度下的含光伏配电网。

1.3 评价函数

为了合理地解释如何根据 FTU 上传信息定位配网馈线发生故障的区段，基于 FTU 实际上传的开关越限信息与开关函数推导的假定开关状态信

息, 利用两者的差异化最小构造评价函数, 如式(6)所示。

$$f_1(x) = \sum_{j=1}^{N_s} |I_j - I_j^*(x)| \quad (6)$$

式中: I_j 为配网中监控终端检测开关的实际状态; $I_j^*(x)$ 为开关函数求得第 j 个开关的期望状态; N_s 为开关总数。

为了防止仅利用式(6)定位故障区段造成区段状态的误判, 根据故障诊断理论中“最小集”概念^[5], 基于故障区段数最小构建评价函数, 如式(7)所示。

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{N_Q} x_i \quad (7)$$

式中: x_i 表示第 i 个区段的状态值; N_Q 为区段总数。

综合上述两个目标, 配网故障定位问题是一个多目标优化问题^[12]:

$$\begin{cases} \min f_1(x) \\ \min f_2(x) \end{cases} \quad (8)$$

2 含光伏配网故障区段定位的MOPSO算法

对于问题式(8), 多数研究通过加权法将其转化为单目标问题。不同权值的设定会影响故障区段的定位结果, 即主观设定权重值可使得搜索尽可能向某个指定目标收敛, 但单目标优化求解容易造成局部收敛的问题, 导致故障区段定位错误^[13]。本文基于 Pareto 最优概念^[2]对上述两个目标采用多目标优化算法求解, 这样最终求得的 Pareto 最优解集为全局收敛的结果, 从而能实现故障区段的准确定位。

目前多目标进化算法如 NSGA-II、MOPSO 等被广泛应用于电力系统多目标优化问题中^[18-19]。其中 MOSPO 相对于 NSGA-II 避免了交叉、变异等个体操作, 计算复杂度低, 且寻优能力更强^[15], 可以更好地满足快速准确定位故障区段的要求。因此本文采用 MOPSO 算法来实现含分布式光伏配网故障区段的定位。

2.1 粒子编码

MOPSO 是在粒子群算法(PSO)基础上构建的。配电网故障区段定位问题中粒子的位置信息表示区段状态的离散信息, 存在 0、1 两种状态, 分别对应区段正常和故障; 粒子的维度表示区段的总数, 所以 N 个馈线区段即代表粒子搜索的空间是 N 维的。

2.2 外部粒子群更新策略

基于 Pareto 最优解集的 MOPSO 收敛过程, 就是每次迭代根据 Pareto 最优概念在内部粒子群中, 选择非支配解所对应的粒子位置, 并基于该粒子与

外部粒子群中粒子的支配关系完成外部粒子群更新的过程。更新策略为: 若内部粒子群中最优粒子的位置 p_{best} 支配外部粒子群中某粒子的位置, 则替换该粒子; 若其被支配则不被替换; 若它们没有支配关系则将该粒子存入外部粒子群^[15]。

2.3 粒子密度信息估计与 g_{best} 位置确定

由于外部粒子群中的非支配粒子之间没有优先关系, 因此粒子的空间分布密度评估成为确定 Pareto 最优解集的主要依据。MOPSO 采用网格密度法评估粒子的空间密度^[15]。根据本文的两个目标函数 f_1 和 f_2 , 可构建一个二维的目标平面, 如图 2 所示(以 6×6 区域为例)。通过把该目标平面等分成 6×6 个区域, 以每个区域中包含外部粒子群中的粒子数作为粒子的密度值。粒子所在区域中包含的粒子数越多, 其密度值越大, 反之越小, 见式(9)。

$$D_i = k \times NOP_i \quad (9)$$

式中: D_i 为第 i 个网格的密度值; NOP_i 为第 i 个网格中外部粒子的个数; k 为正常数, 通常取 1。

MOPSO 的收敛性与 Pareto 最优解集的多样性由 g_{best} 位置策略的选择决定。MOPSO 通过使用轮盘赌的方法选择某个密度较低的区域, 然后在这个空间区域中随机确定一个粒子作为 g_{best} 位置。

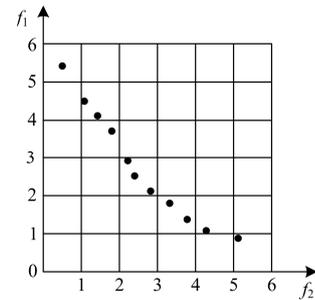


图 2 粒子空间密度评估网格

Fig. 2 Estimation grid of particle density

2.4 内部粒子群更新与 p_{best} 位置确定

通过计算内部粒子群中粒子的飞行速度和位置来更新用于下次迭代的粒子信息。针对本文研究的是二进制离散多目标优化问题, 通过计及两个目标最小所对应粒子的 g_{best} 位置, 根据式(10)更新粒子速度, 从而使粒子的位置能够更快向最优解更新; 同时根据式(11)确定内部粒子群中粒子的位置。

$$v_{in}^{t+1} = wv_{in}^t + c_1 r_1^t (p_{best,in}^t - y_{in}^t) + c_2 r_2^t (g_{best,1,n}^t - y_{in}^t) + \quad (10)$$

$$c_2 r_3^t (g_{best,2,n}^t - y_{in}^t)$$

$$\begin{cases} y_{in}^{t+1} = 1 & r_{in}^{t+1} < \text{sigmoid}(v_{in}^{t+1}) \\ y_{in}^{t+1} = 0 & r_{in}^{t+1} \geq \text{sigmoid}(v_{in}^{t+1}) \end{cases} \quad (11)$$

式中： v_{in}^{t+1} 、 y_{in}^{t+1} 分别为第 i 个粒子在第 $t+1$ 次迭代时在第 n 维空间的速度和位置； $p_{best.in}^t$ 是第 i 个粒子到第 t 次迭代时在第 n 维空间的当前个体最优位置； $g_{best1,n}^t$ 、 $g_{best2,n}^t$ 分别是外部粒子群中到第 t 次迭代为止在第 n 维空间使第一、二个目标最小时所确定的粒子最优位置； w 为惯性权重； c_1 、 c_2 是加速因子； r_1^t 、 r_2^t 、 r_3^t 均为第 t 次迭代中在 $[0,1]$ 范围内的随机数， r_{in}^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代介于 $[0,1]$ 的随机数； $sigmoid(v_i^{t+1})$ 为

$$sigmoid(v_i^{t+1}) = \begin{cases} 0.98 & v_i^{t+1} > 4 \\ \frac{1}{1 + e^{-v_i^{t+1}}} & -4 \leq v_i^{t+1} \leq 4 \\ -0.98 & v_i^{t+1} < -4 \end{cases} \quad (12)$$

p_{best} 位置的确定：如果当前粒子的位置被其 p_{best} 所支配，则 p_{best} 不更新；若当前粒子的位置支配 p_{best} ，则用当前粒子的位置替换 p_{best} ；如果两者互不支配，则随机选择其中一个作为 p_{best} 。

2.5 故障区段的确定

配网故障区段定位问题的 Pareto 最优解集中只存在唯一解对应故障区段。通过分析 Pareto 最优解集中各解，其中使子目标 f_i 最小的解最能反映准确的故障区段^[13]。对该解对应的粒子进行解码从而定位故障区段。

2.6 算法流程

通过对含分布式光伏配网多目标故障定位模型的建立、粒子编码的确定、MOPSO 算法的分析以及故障区段的确定，形成基于 MOPSO 含光伏配电网故障区段定位的算法流程，如图 3 所示。

3 算例分析

本文以图 4 所示的含光伏电源的配电线路进行仿真分析。其中，S 为系统主电源，PV1—PV3 为并入配电网的 3 个光伏电源，K1—K3 为对应光伏的接入开关。算例中设置了 23 个分段开关，如图中黑色圆点所示，由编号 1~23 表示；圆点之间的线段表示馈线区段，编号为(1)~(23)。

根据本文提出的故障区段定位算法，基于 Matlab 编制了基于 MOPSO 的配电网多目标故障区段定位算法程序。参数初始化如下：内部粒子群规模为 100，外部粒子群规模为 50，惯性权重为 0.9，学习因子为 1.5，最大迭代次数为 100。仿真中，粒子位置的维数与配电馈线的区段总数相同，即粒子的维度为 23。

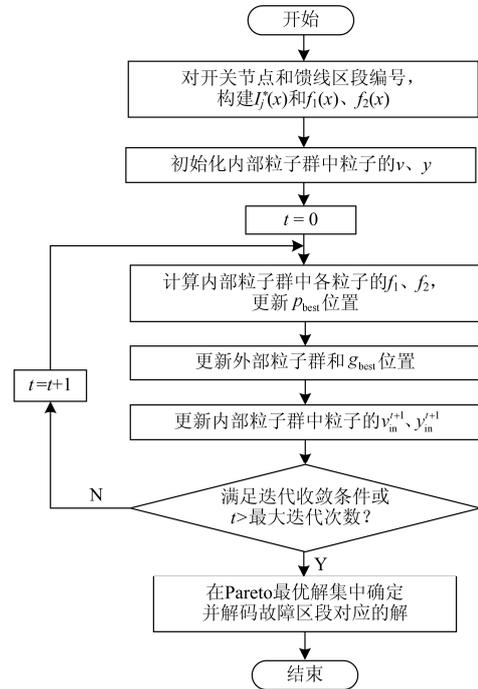


图 3 本文算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed algorithm

表 1 单一和多重故障仿真结果

Table 1 Simulation results of single and multiple fault

故障区段	FTU 上传故障信息序列	光伏接入	畸变位置	定位结果
(8)	[1,1,1,0,0,0,1,-1,-1,-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV1	无	(8)
(4)	[1,1,1,1,-1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV2	无	(4)
(16)	[1,1,-1,-1,-1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,-1,-1,-1,0,0,0,0,0]	PV1、PV2、PV3	无	(16)
(4), (21)	[1,1,1,1,-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV2	无	(4), (21)
(3), (18)	[1,1,1,-1,-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV2、PV3	无	(3), (18)
(13), (17)	[1,1,-1,0,0,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV3	无	(13), (17)
(9), (19)	[1,1,1,-1,-1,0,0,1,1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,-1,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV2、PV3	无	(9), (19)
(8), (10)	[1,1,1,-1,-1,0,0,1,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV2、PV3	无	(8), (10)
(8), (16), (21)	[1,1,1,-1,-1,0,0,1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,-1,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV2、PV3	无	(8), (16), (21)
(8)	[1,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV3	18	(8)
(4), (22)	[1,1,1,1,0,0,0,-1,-1,1,1,-1,-1,0,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0]	PV1、PV3	10, 13	(4), (22)
(8), (14)	[1,1,1,-1,-1,0,0,1,-1,-1,0,0,-1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV2	11, 22	(8), (14)
(10), (17), (22)	[1,0,1,-1,-1,0,0,1,1,1,-1,-1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0]	PV1、PV2、PV3	2, 14	(10), (17), (22)

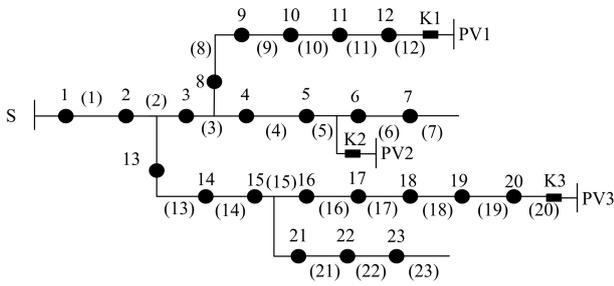


图 4 含光伏的复杂配电网络

Fig. 4 Complex distribution network with PVs

为验证本文所提算法的有效性, 对图 4 所示配电线路的光伏电源在不同接入位置、接入数量以及不同光照强度下, 考虑配网馈线发生单重和多重故障, 以及计及 FTU 上传故障信息存在畸变情况^[20]的故障区段定位进行了仿真, 结果见表 1—表 3 所示。

以区段(5)、(8)发生故障为例进行分析。所有光伏电源并网运行且提供的故障电流都未被 FTU 屏蔽, FTU 实际上传的故障信息序列为[1 1 1 1 1 0 0 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0 0 0], 将该采集信号作为输入, 启动 MOPSO 算法得到如图 5 所示收敛的 Pareto 前沿。

由图 5 可知, Pareto 最优解集中存在三种最优粒子, 其中使 f_2 最小对应的粒子 a_3 编码为[0 0], 表示无区段发生故障; 粒子 a_2 对应编码为[0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0], 对应区段(5)发生故障, 上述两种解不满足定位要求; 使目标 f_1 最小粒子 a_1 的编码为[0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0], 即该粒子的第 5 和 8 维位置为 1, 对应区段(5)、(8)发生故障, 定位结果与预先设置的故障情况相吻合, 且符合上文关于故障区段确定的要求。对于表 1 中故障情形下的故障区段定位同理。

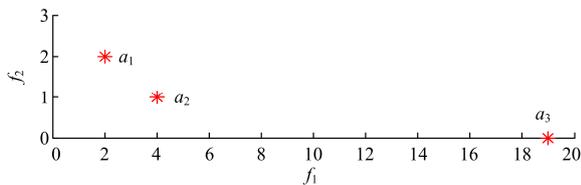


图 5 多重故障时的 Pareto 前沿

Fig. 5 Pareto front for multiple fault

由表 1 中的仿真结果可以看出, 当线路上同一支路或不同支路上发生单一或双重故障时, 在不考虑光照强度的影响下, 不同数量的光伏电源接入配网馈线的不同位置, 本文提出的 MOPSO 定位方法都能获得准确的故障区段定位结果, 具有较高的准

确性。当 FTU 上传故障信息序列中的单个或多个信息发生畸变时, 依然能得出正确的定位结果, 表明算法的容错性较好。

在 3 个光伏电源全都并网运行的前提下, 考虑某光伏电源因当地光照强度较弱导致其提供的故障电流被 FTU 屏蔽的情况, 通过对此情形进行仿真分析, 验证在不同光照强度下光伏电源接入情形时本文提出的开关函数的有效性, 以及所提定位方法的可行性。仿真结果见表 2。

表 2 不同光照强度下的仿真结果

Table 2 Simulation results under different light intensities

故障区段	光照强度	FTU 上传故障信息序列	定位结果
(8)	PV1 接入处	[1,1,1,-1,-1,0,0,1,0,0,0,0,	(8)
	较低	-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0,0,0]	
(16)	PV2、PV3 接入处	[1,1,-1,0,0,0,0,-1,-1,-1,-1,-1,	(16)
	较低	1,1,1,0,0,0,0,0,0,0]	
(4)、(21)	PV1、PV3 接入处	[1,1,1,-1,-1,0,0,0,0,0,0,0,	(4)、(21)
	较低	1,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0]	

当 PV1—PV3 中某个光伏接入处的光照强度较低时, 上文构建的开关函数会将对应光伏电源屏蔽, 而该条馈线分支上 FTU 的故障信息由系统电源决定。根据表 2 的定位结果可以看出, 对于考虑不同光照强度下含光伏的配电线路, MOPSO 算法可实现故障区段的准确定位。

此外, 本文从发生“未成熟收敛”的次数比较 MOPSO 求解本文的多目标模型与使用普通智能算法 BPSO 和 GA 求解单目标模型的性能。分别利用 3 种算法对表 1 中的同一个单一、多重故障进行定位分析, 每种算法连续运行 30 次, 得到三种算法求解出现“未成熟收敛”次数的比较结果如表 3 所示。

表 3 三种算法出现“未成熟收敛”的次数与平均迭代次数

Table 3 Times of premature convergence for three algorithms and average iterative times

算法类型	出现“未成熟收敛”次数			平均迭代次数	
	MOPSO	BPSO	GA	MOPSO	NSGA-II
单一故障	0	3	17	15	27
双重故障	0	5	23	17	30
三重故障	0	6	26	20	32

由表 3 可知, 使用普通智能算法求解带有权重值的单目标优化问题会出现“未成熟收敛”现象, 且次数随着故障数的增加而增加, 而使用 MOPSO 算法避免了对权重的选取, 因此未出现该现象。

另外本文比较了 MOPSO 与 NSGA-II 收敛速度。由于多目标进化算法求解得到的是最优解集, 因此本文设定连续 5 代最优解集不变则迭代截止,

通过连续运行 10 次求得平均迭代次数, 见表 3。MOPSO 算法的平均迭代次数明显要少, 因此其定位故障区段的速度较快, 满足配网故障区段定位快速性的要求。

4 结论

本文设计了单相接地故障下的开关状态编码, 并构建了满足不同光照强度下光伏电源动态投切的新开关函数。在此基础上, 提出了一种基于多目标进化算法的含光伏电源配网的故障区段定位方法, 给出了 MOPSO 算法用于含分布式光伏配网故障区段定位的主要步骤。对本文提出的方法进行了仿真, 结果表明, 该方法适用于单一和多重故障的区段定位, 对接入配电线路不同位置的光伏电源数目没有限制, 且能够实现对畸变信息的容错, 同时能够在不同光照强度下含分布式光伏配网故障区段的定位。相比于使用 NSGA-II 算法和普通智能算法, 定位的快速性和准确性得到提升。

在后续研究工作中, 将会针对光伏电源提供故障电流较小的特性, 研究通过结合辅助故障信息进一步提升定位的准确性。

参考文献

- [1] 董旭柱, 黄邵远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21.
DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [2] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 刘健, 林涛, 同向前, 等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.
LIU Jian, LIN Tao, TONG Xiangqian, et al. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [4] ZHU J, LUBKEMAN D L, GIRGIS A A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 801-809.
- [5] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [6] 郭艳艳, 熊国江. 基于正弦与余弦优化算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 97-101.
GUO Yanyan, XIONG Guojiang. Fault section location in distribution network by means of sine cosine algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 97-101.
- [7] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 纵横交叉算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 109-114.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location for distribution network based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 109-114.
- [8] 刘蓓, 汪飒, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 280-284.
LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 280-284.
- [9] 周凛, 郑柏林, 廖瑞金, 等. 基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 33-37.
ZHOU Quan, ZHENG Bolin, LIAO Ruijin, et al. Fault-section location for distribution networks with DG based on a hybrid algorithm of particle swarm optimization and differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 33-37.
- [10] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 基于纵横交叉算法在含分布式电源的配电网故障定位[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(9): 128-134.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location of distribution network with distributed generation based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(9): 128-134.
- [11] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [12] 金涛, 李鸿南, 刘对. 基于 BPSOGA 的含风电机组的配电线路故障区段定位[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 27-33.
JIN Tao, LI Hongnan, LIU Dui. Faulty section location based on BPSOGA for distribution line with wind turbine

- generator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(6): 27-33.
- [13] 孙国强, 卫志农, 唐利锋, 等. 多目标配电网故障定位 Pareto 进化算法[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(5): 57-61.
SUN Guoqiang, WEI Zhinong, TANG Lifeng, et al. Pareto evolutionary algorithm for multi-objective fault location of distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(5): 57-61.
- [14] 雷倩, 吉兴全, 文福栓, 等. 利用暂态分量的含分布式电源配电系统故障诊断[J]. *电力建设*, 2016, 37(2): 42-49.
LEI Qian, JI Xingquan, WEN Fushuan, et al. Fault diagnosis of distribution system with distributed generation employing transient component[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(2): 42-49.
- [15] CALOS A C C, GREGORIO T P, MAXIMINO S L. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.
- [16] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(2): 36-42.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(2): 36-42.
- [17] 李海涛. 配电网故障定位及在线监测系统的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
LI Haitao. Research and application on fault location and online monitoring system of distribution network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [18] 李鸿鑫, 李银红, 李智欢. 多目标进化算法求解无功优化问题的比较与评估[J]. *电网技术*, 2013, 37(6): 1651-1658.
LI Hongxin, LI Yinhong, LI Zhihuan. Comparison and evaluation on multi-objective evolutionary algorithm for optimal reactive power flow[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(6): 1651-1658.
- [19] 王大为, 朴在林. 基于序优化和模糊蚁群算法的多目标配电网重构[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(9): 44-49.
WANG Dawei, PIAO Zailin. Multi objective distribution network reconfiguration based on ordinal optimization and fuzzy ant colony algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(9): 44-49.
- [20] 郑涛, 潘玉美, 王英男, 等. 配电网具有容错性的快速故障定位方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(6): 63-68.
ZHENG Tao, PAN Yumei, WANG Yingnan, et al. Fast and robust fault location for distribution systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(6): 63-68.

收稿日期: 2017-07-09; 修回日期: 2017-12-28

作者简介:

吴凡(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网自愈控制的理论与方法; E-mail: jskdwf@126.com

赵晋泉(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场。E-mail: jqzhao2@tom.com

(编辑 张爱琴)