

# 含逆变型分布式电源的花瓣型配电网故障定位策略研究

顾大德<sup>1</sup>, 肖健<sup>1</sup>, 韦梦立<sup>2</sup>, 陈文志<sup>3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510000; 2. 东南大学, 南京 411110;  
3. 长沙天恒测控技术有限公司, 长沙 336017)

**摘要:**针对含逆变型分布式电源( Inverter Interfaced Distributed Generation, IIDG) 的花瓣型配电网的故障定位问题, 文中提出了一种基于电气参数的综合故障定位方法, 可用于解决三种不同类型的故障问题。对于两相短路故障, 采用基于负序电流相位差的故障线路识别方法; 对于单相接地故障, 基于零序分量推导出测距方程, 并利用区段线路长度约束排除虚假根, 准确定确定实际故障位置; 对于对称故障, 利用多线路正序电流的相位和幅值来确定故障位置; 利用 PSCAD/EMTDC 系统对所提出的方法在不同故障情景下进行了故障距离和接地电阻测试。结果表明, 与其他方法相比, 所提方法定位精度更高, 在不同故障类型下的定位误差不超过 1%, 从而验证了该方法在含 IIDG 的花瓣型配电网中具有更高的精度和抗故障能力。

**关键词:**逆变型分布式电源; 花瓣型配电网; 故障定位; 阻抗法

**DOI:**10.19753/j.issn1001-1390.2023.11.007

中图分类号:TM711

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2023)11-0053-07

## Research on fault location strategy for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generation

Gu Dade<sup>1</sup>, Xiao Jian<sup>1</sup>, Wei Mengli<sup>2</sup>, Chen Wenzhi<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China.  
2. Southeast University, Nanjing 411110, China. 3. Tunkia Co., Ltd., Changsha 336017, China)

**Abstract:** In order to solve the fault location problem of the petal-shaped distribution network with inverter interfaced distributed generation (IIDG), a comprehensive fault location method based on electrical parameters is proposed, which can address fault location for three distinct fault types. For two-phase short circuit faults, a fault line identification method utilizing the phase difference of negative sequence current is proposed. For single-phase grounding faults, a distance measurement equation is derived based on zero-sequence components, with the inclusion of section line length constraints to eliminate spurious roots and accurately determine the actual fault location. For symmetrical faults, the fault location is determined by leveraging the phase and magnitude of positive sequence currents across multiple lines. The fault distance and grounding resistance of the proposed method are tested by PSCAD/EMTDC system under different fault scenarios. The results demonstrate that the proposed method achieves higher location accuracy compared to other approaches, with location errors not exceeding 1% for different fault types, thereby confirming the superior precision and fault-tolerant capabilities of the method in petal-shaped distribution networks with IIDG.

**Keywords:** inverter-interfaced distributed generation, petal-shaped distribution network, fault location, impedance method

### 0 引言

城市电网承担着为用户提供优质电力的重要责任。传统的辐射式配电网存在故障范围广、停电时间长等问题。相比之下, 以花瓣型配电网为代表的闭环配电网具有灵活的运行控制策略和高效经济的优点, 现已在中 国、新加坡和法国的一些城市电网中建成<sup>[1-3]</sup>。

目前, 用于低源有压配电网的故障定位方法得到

广泛的研究。基于智能算法的故障定位方法通常具备良好的容错性能, 并且可以适应复杂结构的配电网<sup>[4-6]</sup>。但该方法只能对故障线路或故障部分进行定位。另一方面, 基于行波的方法可根据行波折射和反射的时间特征来准确确定故障点<sup>[7-9]</sup>。但该方法受故障时刻相角影响较大, 并且行波传输过程中的折射和反射波会互相干扰。此外, 安装高采样率的行波测距设备成本较高。基于阻抗的方法源于电路理论, 具有灵活的适用性<sup>[10-15]</sup>。当测量到故障时的电压和电流

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20200824)

时,该方法使用这些数据来计算故障段的阻抗。由于线路阻抗与长度成正比,因此可以通过这种方式计算出故障距离。文献[16]利用相邻开关站电压幅值预测误差判断故障发生线路,并研究了不同位置故障情况下的保护灵敏度。文献[17]提出了仅使用电流幅度的算法来解决不平衡电力系统中单相接地故障的定位问题,但该方法的有效性受到系统运行方式、负载电流和故障电阻的影响。文献[18]将行波法和阻抗法相结合,通过故障指示器对故障所在区段进行判断,再利用双端行波法对主线路故障进行测距,使用阻抗法对支路故障进行测距,从而实现对多分支线路故障的定位。但该方法需要加装行波测距设备,因此成本较高。在花瓣型配电网中。环路的两端连接在同一母线上,导致故障线两侧的电流存在相关性,这一特性有利于基于阻抗的方法在花瓣型配电网中的应用。文献[19]利用故障线上的零序电流之间的关系,根据保护装置接收到线路对面零序电流的稳态值后的过线零序电流的比值准确定位故障。该方法通信量小,对数据同步要求低,但未考虑 IIDG 接入情况。文献[20]研究了带同步分布式发电机的花瓣型配电网的负序电流比较方法。该方法不受负载电流和故障电阻的影响,但对三相故障无效。

另一方面,大量光伏发电、风力发电机组等新能源发电机组以 IIDG 的形式接入网络。电网结构的变化和 IIDG 的接入使得配电网的故障特征变得更加复杂。因此,传统配电网的故障定位方法难以应用于具有 IIDG 的花瓣型配电网<sup>[21]</sup>。文献[22]针对含 IIDG 花瓣型配电网的单相接地故障,利用对称分量法得到故障点及线路各序电流的公式,并分析了花瓣型配电网在发生单相接地故障时各电流的变化规律,但没有提出具体的故障定位方法。文献[23]采用了双向过流继电器和时流特性对带有分布式发电机的花瓣型配电网进行故障线路的定位,但该方法的主要目标是识别故障线路,因此无法用于故障位置的准确定位。

综上所述,目前已有的故障定位方法很难计算具有 IIDG 的花瓣型配电网的故障位置。因此,本文提出了一种基于电气参数的综合故障定位方法。其中,对于两相短路故障,提出基于负序电流相位差的故障线路识别方法,并推导出仅利用负序电流幅值确定故障位置的定位公式。对于单相接地故障,通过配电网的信息采集环节确定零序电压和电流的相关信息,建立关于故障距离的一元二次测距方程,并以区段线路长度为约束确定真实故障位置。对于对称故障,利用线路两端的正序电压和含逆变器接口分布式发电机输出的电流识别故障线路,并利用多条线路上的正序电流来定位故障位置。该方法针对不同类型的故障情况提出相应的识别方法和定位公式,从而使得故障点的识

别和定位更加准确可靠。此外,该方法还能够有效降低线路投入成本,并且具有较高的测距精度。

## 1 花瓣型配电网模型建立

### 1.1 接入 IIDG 的花瓣型配电网模型

考虑接入 IIDG 的花瓣型配电网模型如图 1 所示。

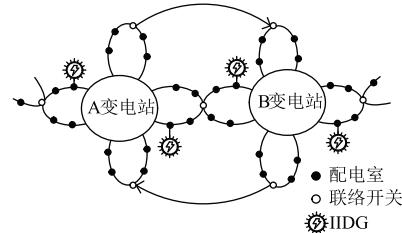


图 1 接入 IIDG 的花瓣型配电网模型

Fig. 1 Petal-shaped distribution network model with IIDG

图 1 中同一变电站每两回馈线相连组成环网主线,形成闭环的花瓣式结构,闭环运行。不同的变电站每两个环网通过联络开关相互连接,组成花瓣式相切的形状。重要等级的负荷一般位于两个环网的连接处。正常情况下,联络开关处于常开状态。

单花瓣配电网的拓扑结构如图 2 所示。图 2 中花瓣型配电网由五条同一类型的输电线路组成,按照顺时针方向分别表示为线路 L1~L5。每条线路的两端均设置断路器。当线路故障发生时,故障线路两端的断路器瞬间动作,隔离故障区域。由于环网结构的存在,花瓣开环运行,手拉手供电,保障了非故障区域的电力供应,实现了电力用户“N-1”安全准则,保证了线路运行的安全可靠。

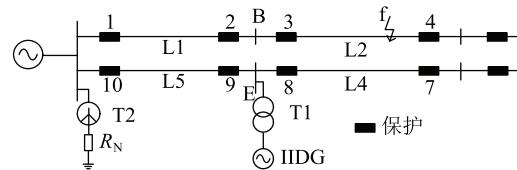


图 2 单花瓣配电网拓扑结构图

Fig. 2 Topology structure diagram of single petal distribution network

在图 2 中,T2 表示系统接地变压器,R<sub>N</sub>表示中性点接地电阻。小电阻接地方式可以改善不对称故障时的电流水平,有利于提高保护性能。

### 1.2 IIDG 故障输出特性

IIDG 的故障等值模型主要取决于其控制策略。并网 IIDG 一般采用 PQ 控制策略,在公共耦合点处的电压或频率波动时,PQ 控制策略会使得 IIDG 的功率输出保持稳定。基于正序分量的控制策略在改善 IIDG 的输出特性和减少对配电网电能质量的影响方面表现出了良好的控制效果,并因此广泛应用。IIDG 的故障等效模型可以由正序网络中的电压控制电流源和负序

网络中的开路来表示。

### 1.3 接入 IIDG 的花瓣型配电网故障等效模型

当图 2 中 f 点发生故障时,接入 IIDG 的花瓣型配电网的正序网络和负序网络如图 3 和图 4 所示。正序分量和负序分量分别由下标(1)、(2)表示。 $E_s$  和  $Z_s$  分别表示系统的等值电势和等值内阻抗,  $Z_{Tl}$  表示并网变压器  $Tl$  的等效阻抗,  $Z_1$  和  $Z_2$  分别表示公共耦合点上游和下游线路的阻抗。 $Z_f$  表示故障点附加电阻,  $\alpha$  表示故障分支的位置,  $I_1$  和  $I_2$  表示故障线路两端的电流,  $-U_{f(1)}$  和  $-U_{f(2)}$  分别表示虚拟正负序电势。若发生对称故障,则  $-U_{f(1)}$  为零。 $-U_{PCC(1)}$  表示公共耦合点的正序电压,  $I_{DG}$  是 IIDG 的输出电流。

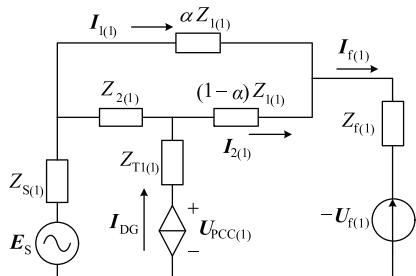


图 3 正序网络

Fig. 3 Positive-sequence network

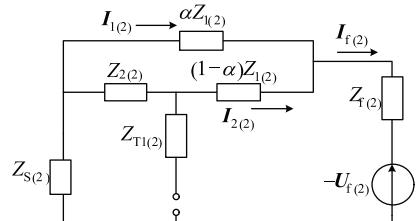


图 4 负序网络

Fig. 4 Negative-sequence network

## 2 故障定位方法

### 2.1 非对称故障的定位方法

当花瓣型配电网发生不对称故障时,由于三相之间的电气参数不相等,因此故障电流中的负序分量和零序分量会随着故障类型的不同而不同。例如,在单相接地故障中,负序电流会明显增大,而其他电流没有明显变化;在双相短路故障中,零序电流明显增大,而其他电流没有明显变化。因此,需要根据不同的故障类型采用不同的故障定位方法。此外,根据 IIDG 的输出特性,其负序电流的特性不受 IIDG 接入的影响,因此本文先利用负序电流的特性定位故障段,再分别用不同的方法定位具体的故障点。

首先,假设点 f 处发生故障,由图 4 和欧姆定律得两端的负序电流  $I_{1(2)}$  和  $I_{2(2)}$  为:

$$I_{1(2)} = \frac{(1 - \alpha)Z_{1(2)} + Z_{2(1)}}{Z_{1(2)} + Z_{2(2)}} I_{f(2)} \quad (1)$$

$$I_{2(2)} = \frac{\alpha Z_{1(2)}}{Z_{1(2)} + Z_{2(2)}} I_{f(2)} \quad (2)$$

由于每条线路的单位阻抗相同,因此  $I_{1(2)}$  和  $I_{2(2)}$  具有相同的相位。因此,通过对两侧负序电流相位差进行检测,当相位差为  $180^\circ$  时,该线路为正常线路;当相位差为 0 时,则该线路为故障线路。

确定故障线路后,需要判断出现故障的类型。使用专门的负序电流传感器和零序电流传感器来检测故障线路,当零序电流明显增大时,此时故障为双相短路故障,需要进一步定位故障点。联立上式可得故障位置  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{(Z_{1(2)} + Z_{2(2)}) I_{2(2)}}{Z_{1(2)} (I_{1(2)} + I_{2(2)})} \quad (3)$$

则母线 A 到故障点 f 的距离可由下式求得:

$$d = \alpha \frac{Z_{1(2)}}{Z_{0(2)}} = \frac{I_{2(2)}}{I_{1(2)} + I_{2(2)}} l_{\text{total}} \quad (4)$$

式中  $Z_{0(2)}$  为每公里线路负序阻抗; $l_{\text{total}}$  为环路的总长度。

当负序电流传感器检测到电路中负序电流明显增大时,此时故障类型为单相接地故障。由于此时根据式(1)和(2)已确定故障段的范围,因此需要进一步得到故障点。根据对称分量法,得到花瓣型配电网中一段线路发生单相接地故障时的等效零序网络,如图 5 所示。

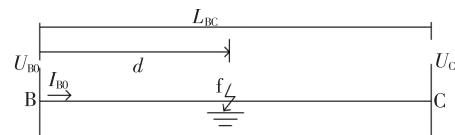


图 5 花瓣型配电网 BC 段零序网络图

Fig. 5 Zero-sequence network diagram of BC section of petal-shaped distribution network

在配电网中的每个节点处安装信息采集节点,用于收集零序电压和电流的相位信息。令  $\dot{U}_{B0}$  和  $\dot{U}_{C0}$  表示故障线路 B、C 两侧的零序电压,  $\dot{I}_{B0}$  表示故障线路 B 侧的零序电流。则从线路 B 侧推导出故障点处的零序电压  $\dot{U}_{B,FO}$  为:

$$\begin{cases} Z_{CB} = \frac{1}{j\omega C_0 d' / 2} \\ Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \\ \dot{U}_{B,FO} = \dot{U}_{B0} - \left( \dot{I}_{B0} - \frac{\dot{U}_{B0}}{Z_{CB}} \right) Z_0 d' \end{cases} \quad (5)$$

式中  $Z_{CB}$  为线路 B 侧零序电容的容抗值; $C_0$  为单位长度线路零序电容; $Z_0$  为单位长度线路零序阻抗; $R_0$  为单位长度线路零序电阻; $L_0$  为单位长度线路零序电感; $d'$  为故障点到 B 端的距离。

从线路 C 侧推算故障点处的零序电压  $\dot{U}_{C,FO}$  为:

$$\begin{cases} Z_{CC} = \frac{1}{j\omega C_0 \frac{L_{BC} - d'}{2}} \\ \dot{U}_{C,FO} = \dot{U}_{CO} + \frac{\dot{U}_{CO}}{Z_{CC}} Z_0 (L_{BC} - d') \end{cases} \quad (6)$$

式中  $Z_{CC}$  为线路 C 侧零序电容的容抗值;  $L_{BC}$  为线路 BC 的总长度。

由于发生不对称故障时, 故障点两侧的零序电压相同, 因此令  $\dot{U}_{B,FO} = \dot{U}_{C,FO}$  得:

$$\dot{U}_{BO} - \left( \dot{I}_{BO} - \frac{\dot{U}_{BO}}{Z_{CB}} \right) Z_0 d' = \dot{U}_{CO} + \frac{\dot{U}_{CO}}{Z_{CC}} Z_0 (L_{BC} - d') \quad (7)$$

对式(7)求解, 即可求得故障点到 B 端的距离  $d'$ 。由于解一元二次方程会出现多根的情况, 真实根为  $0 \sim L_{BC}$  内的实数。

## 2.2 对称故障的定位方法

当花瓣型配电网发生对称故障时, 故障电流中不包含负序分量和零序分量。因此, 利用正序电流的性质进行故障定位分析。由图 3 和欧姆定律可知, 故障线路两端的正序电流为:

$$I_{1(1)} = \frac{(1 - \alpha) Z_{1(1)} + Z_{2(1)}}{Z_{1(1)} + Z_{2(1)}} I_{f(1)} - \frac{Z_{2(1)}}{Z_{1(1)} + Z_{2(1)}} I_{DG} \quad (8)$$

$$I_{2(1)} = \frac{\alpha Z_{1(1)}}{Z_{1(1)} + Z_{2(1)}} I_{f(1)} + \frac{Z_{2(1)}}{Z_{1(1)} + Z_{2(1)}} I_{DG} \quad (9)$$

联立式(8)和(9)可得:

$$\alpha = \frac{(Z_{1(1)} + Z_{2(1)}) I_{2(1)} - Z_{2(1)} I_{DG}}{Z_{1(1)} (I_{1(1)} + I_{2(1)})} \quad (10)$$

取每条线路两端的正序电流分别代入上式计算, 若计算结果为无穷大, 则该线路为正常线路; 若计算结果在  $[0, 1]$  以内, 则为故障线路。当故障电阻较低时, 负载电流在正序电流中的比例很小, 此时计算距离精度较高。但当故障电阻较大时, 负载电流所占比例较大, 此时估计距离与实际距离误差较大。因此, 对于通信水平更高的配电网系统, 可根据基尔霍夫电压定律获得精度更高的故障定位结果, 具体公式如下:

$$d'' = \frac{Z_{L_f(1)} I_{2f(1)} + \sum Z_{Lx(1)} I_{2x(1)} - \sum Z_{Ly(1)} I_{2y-1(1)}}{Z_{L0(1)} (I_{2f-1(1)} + I_{2f(1)})} \quad (11)$$

式中  $Z_{L_f(1)}$  为故障线路  $L_f$  的正序阻抗;  $Z_{Lx(1)}$  为故障线下游线路  $L_x$  的正序阻抗;  $Z_{Ly(1)}$  为故障线路上游线路  $L_y$  的正序阻抗。

结合上述技术和理论分析, 文中提出的花瓣型配电网故障定位流程如图 6 所示。

首先, 使用传感器采集配电网的正、负、零序分量。然后, 检测线路内是否存在负序和零序分量, 以判断是否为对称故障。若不存在负序和零序分量, 则属于对称故障。在这种情况下, 需要计算故障线路两端的正序

电流, 再根据式(10)来定位故障位置。若线路内存在负序和零序分量, 则为不对称故障。在这种情况下, 需要首先根据负序电流相位差来定位故障段, 然后再检测线路内的零序电流和负序电流, 以判断故障类型。当负序电流明显增大时, 表明故障为单相接地故障。此时需计算故障线路两端的零序电压, 并根据式(7)来定位故障位置。当零序电流明显增大时, 表明故障为双相短路故障。此时需要计算故障线路两端的负序电流, 并根据式(4)来定位故障位置。最后, 输出故障定位结果。

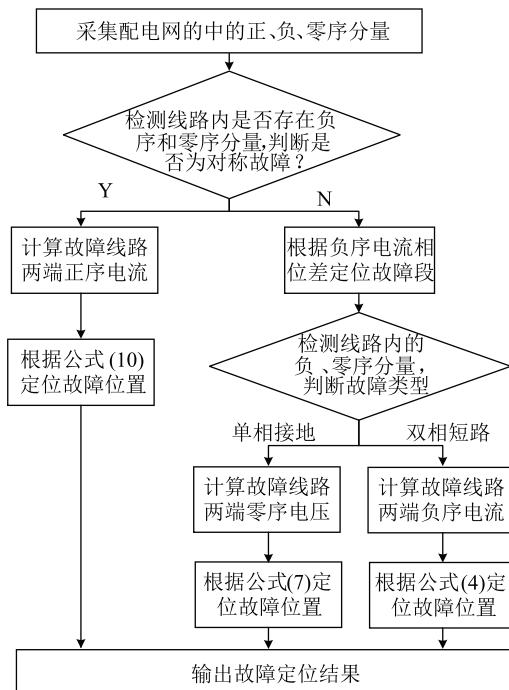


图 6 故障定位流程图

Fig. 6 Fault location flowchart

## 3 仿真实验

本节在 PSCAD/EMTDC 系统中对提出的方法进行测试。单位长度线路参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	值
线路电压等级	10 kV
每条线路长度	1 km
单位长度线路零序电容	$C_0 = 2.58333 \times 10^{-10} \text{ F/m}$
单位长度线路零序电阻	$R_0 = 1.23 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$
单位长度线路零序电抗	$L_0 = 9.167 \times 10^{-7} \text{ H/m}$
IIDG 容量	1 MW

为比较在不同故障位置处的测量结果准确性以及分析接地电阻的影响, 分别将实际故障点设置在距离左端点 500 m、1 000 m、1 500 m 和 2 000 m 处, 并设定接地电阻分别为 0 Ω、1 Ω、10 Ω、100 Ω。当故障类型为双相短路故障时, 由式(4)可计算故障点距左端点距

离,结果如表 2 所示。

表 2 双相短路故障测距结果

Tab. 2 Distance measurement result of the double-phase short circuit fault

接地电阻/Ω	0	1	10	100
实际故障点距左端点距离/m	计算故障点距左端点距离/m			
500	504.8	504.8	504.8	504.8
1 000	1 008.1	1 008.1	1 008.1	1 008.1
1 500	1 510.6	1 510.6	1 510.6	1 510.6
2 000	2 007.2	2 007.2	2 007.2	2 007.2

通过对比表 2 的结果,可以发现使用提出的方法测量不同故障点的双相短路故障距离时,最大绝对误差为 10.6 m,最大相对误差为 0.96%。这表明所提出的方法具有较高的测距精度。此外,观察上表还可以发现接地电阻的变化对计算得到的故障点距离没有影响。无论接地电阻的值如何增大,得到的结果保持不变,这也降低了对接地电阻变化的敏感性,减少了在现场环境中的复杂度和不确定性。

在单相接地故障类型下,由式(7)得计算故障点距左端点距离。首先需对两侧零序电压及左侧零序电流进行同步采样,并进行傅里叶变换,得到基波零序电压、电流相量值,随后将这些值代入一元二次方程式(7)中,即可得到故障点位置,结果如表 3 所示。

表 3 单相接地故障测距结果

Tab. 3 Distance measurement result of the single-phase grounding fault

接地电阻/Ω	0	1	10	100
实际故障点距左端点距离/m	计算故障点距左端点距离/m			
500	498.9	498.9	498.9	498.9
1 000	996.5	996.5	996.5	996.5
1 500	1 493.8	1 493.8	1 493.8	1 493.8
2 000	1 992.9	1 992.9	1 992.9	1 992.9

通过对比表 3 中不同故障点发生单项接地故障时的测距结果,可以观察到最大的绝对误差为 7.1 m,并且最大的相对误差为 0.41%。这些数据显示出所提出的算法在解决不对称故障定位方面具备优异的性能。同时,由于单相接地故障定位依赖于简单的电压和距离测量,而双相接地故障的电流路径更加复杂且不稳定,因此单相接地故障定位具有更高的精度。

当故障类型为对称故障时,由式(11)得计算故障点距左端点距离,结果如表 4 所示。

通过对比发生对称故障时不同故障点测距结果可知,最大绝对误差为 5.1 m,最大相对误差为 0.32%,这说明在发生对称故障的情况下,所提出的算法仍能准确定位故障段和故障点,并且定位的精度比发生不

对称故障时更高。这种准确性的实现归因于对称故障中电网两侧的电压、电流等参数变化相同,因此其信号可以在各个节点上得到共享,并通过测量数据进行准确测量。进一步分析发现,接地电阻即使在发生对称故障的情况下也没有对测距结果产生明显影响。这一点十分重要,因为接地电阻是一个十分常见的问题,若它会对测距结果产生显著影响,那么所提出的方法的应用性和实用性将大打折扣。同时,通过对比表 2、3、4 可以发现,本文提出的故障定位综合方法适用于花瓣型配电网可能发生的常见故障类型,包括线路短路、接地故障、相间短路等。此外,该方法能够实现快速精确定位故障源,具有广泛的应用范围。除了定位故障点,该方法还能够帮助分析故障的具体原因,从而有针对性地采取相应的措施进行修复和防范,为未来的故障预防提供有力的参考和依据。

表 4 对称故障测距结果

Tab. 4 Distance measurement result of the symmetrical fault

接地电阻/Ω	0	1	10	100
实际故障点距左端点距离/m	计算故障点距左端点距离/m			
500	501.2	501.2	501.2	501.2
1 000	1 002.7	1 002.7	1 002.7	1 002.7
1 500	1 504.9	1 504.9	1 504.9	1 504.9
2 000	2 005.1	2 005.1	2 005.1	2 005.1

最后,为了验证所提方法的优越性,与文献[24]中的方法进行对比,对比结果如表 5 所示。

表 5 本文方法与文献[24]中故障定位方法的对比

Tab. 5 Comparison between the proposed method and the fault location method in reference [24]

故障类型	实际故障点距左端点距离/m	文中方法	文献[24]中方法
对称故障	500	501.2	516.3
	1 000	1 002.7	1 038.4
	1 500	1 504.9	1 556.2
不对称故障	500	498.9	508.6
	1 000	996.5	1 028.7
	1 500	1 493.8	1 547.9

根据表 5 所示数据,本文提出的方法相较于文献[24]的方法表现出更高的精度。这一结果源于文献[24]中的方法忽略了从环路的另一端提供的故障电流,这可能导致在花瓣型配电网的故障定位中出现较大误差。因此,本文提出的方法在含有分布式电源的花瓣型配电网中具有更高的精度和更优越的抗故障能力。

#### 4 结束语

本文研究了含 IIDG 的花瓣型配电网发生对称故障和非对称故障时的故障定位问题,提出了一种综合

故障定位方法。

1) 该方法利用负序电流特性及检测零序电流来定位双相短路故障点, 利用基于零序分量的阻抗法则来定位单相接地故障点, 同时通过分析故障线的正序电压和 IIDG 的输出电流来定位对称故障点。仿真结果表明该方法与实际故障位置的误差在 0.5% 以内。

2) 同时本文考虑了花瓣网的闭环结构和 IIDG 的接入对故障电流特性的影响, 通过分析不同类型的故障, 实现了先定位故障线再精确定位到故障点。仿真结果表明, 误差一般在 1% 以内。

因此, 本文提出的方法对于常见故障类型的定位具有较好的效果。然而, 为了进一步提高定位精度, 需要减少同步误差的影响。未来工作将继续探索其他可能的改进方案, 以应对更加复杂的故障类型, 并为实际应用提供更加可靠的定位方法。

### 参 考 文 献

- [1] 黄河, 田浩, 解进军, 等. 新加坡电网高可靠性供电方案分析[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 91-97.  
Huang He, Tian Hao, Xie Jinjun, et al. High-reliability power supply scheme analysis for singapore power grid[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 91-97.
- [2] 郭少飞, 李铁成, 段剑, 等. 适用于花瓣形配电网的联络线后备保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 10-18.  
Guo Shaofei, Li Tiecheng, Duan Jian, et al. Backup Protection for Tie Lines in a Petal Distribution Network[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 10-18.
- [3] Vargas R, Macedo L H, Home-Ortiz J M, et al. Optimal restoration of active distribution systems with voltage control and closed-loop operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2295-2306.
- [4] Li W, Su J, Wang X, et al. Fault location of distribution networks based on multi-source information[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 76-84.
- [5] 温才权, 韦鑫, 王杰, 等. 基于 CEEMD-PSD 算法的变电站控制电缆故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 80-89.  
Wen Caiquan, Wei Xin, Wang Jie, et al. Frequency domain reflectionable fault locationspectrum leakagepower spectral densitycomplementary ensemble empirical mode decomposition[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 80-89.
- [6] 郑聰, 周海峰, 郑东强, 等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 169-179.  
Zheng Cong, Zhou Haifeng, Zheng Dongqiang, et al. An active distribution network fault location method based on improved multi-universe algorithm[J]. Power System Protection and Control, , 2023, 51(2): 169-179.
- [7] 戴锋, 王政, 程孟晗, 等. 考虑短线路折反射的配电网故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 122-130.  
Dai Feng, Wang Zheng, Cheng Menghan, et al. Study on fault location considering refraction and reflection of short lines in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 122-130.
- [8] 李练兵, 孙腾达, 曾四鸣, 等. 基于多端行波差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 140-147.  
Li Lianbing, Sun Tengda, Zeng Siming, et al. Fault location method for power system protection and control, 2022, 50(3): 140-147.
- [9] 乔文, 师琛, 李舟, 等. 基于行波折反射特征和网络拓扑的配电网单相接地故障定位方法[J]. 供用电, 2022, 39(1): 65-73.  
Qiao Wen, Shi Chen, Li Zhou, et al. Single-phase ground fault location method of distribution network based on traveling wave refraction and reflection characteristics and network topology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 65-73.
- [10] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.  
Qi Zheng, Huang Chaohui, Chen Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [11] Li J, Gao M, Liu B, et al. Fault location algorithm in distribution networks considering distributed capacitive current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(5): 2785-2793.
- [12] 王丹, 白杰, 张昭, 等. 利用零序阻抗相频特性的谐振接地系统故障选线方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 146-152.  
Wang Dan, Bai Jie, Zhang Zhao, et al. Study on Fault Line Selection Method by Using Zero-sequence Impedance Phase-frequency Characteristics in Resonant Earthing System[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 146-152.
- [13] Chen Y, Yin J, Li Z, et al. Location for single - phase grounding fault in distribution network based on equivalent admittance distortion rate [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(11): 1716-1729.
- [14] 周石金, 何晋, 曹鲁成, 等. 基于测量阻抗变化的含 IIDG 配电网保护研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 131-136.  
Zhou Shijin, He Jin, Cao Lucheng, et al. Research on protection of distribution network with IIDG based on measurement of impedance change[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 131-136.
- [15] 李永丽, 王伟康, 张云柯, 等. 花瓣状配电网主干线的自适应全线速动电流保护[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(8): 844-851.  
Li Yongli, Wang Weikang, Zhang Yunke, et al. Adaptive full-line snap-motion current protection for the trunk of a petal-shaped distributed network[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(8): 844-851.
- [16] 李铁成, 郭少飞, 王献志, 等. 基于电压预测误差的“花瓣”型配电网保护原理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(6): 79-88.  
Li Tiecheng, Guo Shaofei, Wang Xianzhi, et al. Principle of relay protection for petal-shape distribution network based on voltage prediction error[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(6): 79-88.
- [17] Das S. Distribution fault-locating algorithms using current only [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1144-1153.
- [18] 邹祁武, 胡金磊, 孙云莲, 等. 一种基于故障指示器的行波—阻抗法双端带支路配电网故障定位方法[P]. 广东省: CN108627741B, 2020-06-16.  
Zou Qiwu, Hu Jinlei, Sun Yunlian, et al. A fault location method for double-ended distributed network with branches based on traveling wave-impedance and fault indicators[P]. Guangdong Province: CN108627741B, 2020-06-16.
- [19] Zhao Z G, Geng S B, He Y K, et al. A grounding fault location method for petal-type urban power grid based on zero-sequence current correla-

- tion [ C ] // ICITEE-2019: 2nd International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering. 2019.
- [20] Biller M, Jaeger J. Novel distance protection algorithm based on current comparison for closed-ring structures with distributed generation [ C ] // International Conference on Developments in Power System Protection. 2020.
- [21] Chen X, Yuan S, Li Y, et al. Fault location method for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generators [ J ]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6) : 543-553.
- [22] 陈晓龙, 袁姝, 李永丽, 等. 含逆变型分布式电源花瓣式配电网单相接地故障特性分析 [ J ]. 电力自动化设备, 2022, 42(4) : 129-137.
- Chen Xiaokong, Yuan Shu, Li Yongli, et al. Analysis of single-phase grounding fault characteristics in petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generator [ J ]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4) : 129-137.
- [23] Polajzer B, Pintaric M, Roser M, et al. Protection of mv closed-loop distribution networks with bi-directional overcurrent relays and goose communications [ J ]. IEEE Access, 2019, 7: 165884-165896.
- [24] Alwash S F, Ramachandaramurthy V K, Mithulanthan N. Fault-loc-

ation scheme for power distributed system with distributed generation [ J ]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3) : 1187-1195.

作者简介:



顾大德(1987—),男,工程师,研究方向为电力系统及其自动化。Email:18024590988@189.cn

肖健(1976—),男,博士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化。Email:dilly01@163.com

韦梦立(1993—),男,通信作者,博士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。Email:weimengli@seu.edu.cn

陈文志(1983—),男,硕士,研究方向为电磁计量。  
Email:chenwzh@tunkia.com

(上接第 36 页)

- [20] 李守茂, 戚嘉兴, 白星振, 等. 基于 IPSO-WNN 的综合能源系统短期负荷预测 [ J ]. 电测与仪表, 2020, 57(9) : 103-109.
- Li Shoumao, Qi Jiaxing, Bai Xingzhen, et al. A short-term load prediction of integrated energy system based on IPSO-WNN [ J ]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9) : 103-109.
- [21] 王成亮, 石凡, 王宏华, 等. 基于改进多目标粒子群的 HVDC 交流滤波器优化设计 [ J ]. 电测与仪表, 2023, 60(4) : 57-63.
- Wang Chengliang, Shi Fan, Wang Honghua, et al. Optimization design of AC filters for HVDC system based on improved multi-objective particle swarm [ J ]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4) : 57-63.

作者简介:



王钰(1989—),男,硕士,工程师,研究方向为分布式能源与配网调控运行及管理。

Email:1016979647@qq.com

郝毅(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度运行及管理。  
Email:15922110029@163.com

王磊(1982—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度运行及管理。  
Email:wangleinet@163.com

党旭鑫(1992—),男,本科,工程师,研究方向为分布式能源与配网调控运行。  
Email:327627970@qq.com

蒋立媛(1988—),女,本科,工程师,研究方向为自动化主站运维。  
Email:jiangliyuanzaidong@163.com

张育炜(1998—),男,硕士研究生,研究方向为分布式能源与配网/微网。  
Email:yuweizhang@tju.edu.cn

肖迁(1988—),男,博士,副教授,研究方向为分布式能源与配网/微网、  
电力电子技术(多电平变换器等)及其在综合能源系统和电池储能系统  
中的应用等电力电子化电力系统领域。

Email:xiaocqian@tju.edu.cn

收稿日期:2023-06-09;修回日期:2023-08-25  
(王克祥 编发)