

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231515

# 含多分布式电源的小电阻接地系统单相接地故障特征分析

田君杨<sup>1</sup>, 李海勇<sup>1</sup>, 蒋连钿<sup>1</sup>, 沈梓正<sup>1</sup>, 任浩林<sup>2</sup>, 郭丽伟<sup>2</sup>

(1. 广西电网电力调度控制中心, 广西 南宁 530023; 2. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 经小电阻接地方式配电网系统的单相接地故障特征会受到类型不一的并网分布式电源(distributed generation, DG)所采用的接地方式影响。针对此问题, 结合对称分量法, 首先建立了含有多个、不同类型、不同接地方式并网 DG 的配电网单相接地故障分析模型。然后对系统单相接地故障点电流和线路的三序电流进行了分析。最后, 利用 Matlab/Simulink 搭建单相接地故障仿真模型, 验证了对故障电流特征分析的正确性。结果表明, 并网 DG 为不接地方式时对系统故障特征影响最小。这为并网 DG 的种类和并网变压器接地方式的选择提供一定的理论依据。

**关键词:** 分布式电源; 单相接地故障; 经小电阻接地方式配电网; 故障电流; 变压器接地方式

## Analysis of single-phase grounding fault characteristics of low resistance grounding system with multi-distributed power supply

TIAN Junyang<sup>1</sup>, LI Haiyong<sup>1</sup>, JIANG Liandian<sup>1</sup>, SHEN Zizheng<sup>1</sup>, REN Haolin<sup>2</sup>, GUO Liwei<sup>2</sup>

(1. Guangxi Power Grid Power Dispatching Control Center, Nanning 530023, China; 2. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The single-phase grounding fault characteristics of the distribution network system via low resistance grounding mode will be affected by the grounding mode adopted by different types of grid-connected DGs. Aiming at the problem, combined with the symmetrical component method, a single-phase grounding fault analysis model of distribution network with multiple grid-connected DGs having different types and grounding modes is established first. The single-phase grounding fault point current of the system and the three-sequence current of the line are analyzed afterwards. Finally, the simulation model of single-phase ground fault is built by Matlab/Simulink, which verifies the correctness of the analysis of fault current characteristics. The results show that the grid-connected DG being ungrounded has the least impact on the system fault characteristics. This provides a theoretical basis for the selection of the type of grid-connected DG and the grounding mode of the grid-connected transformer.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

**Key words:** distributed power system; single-phase grounding fault; distribution network through low resistance grounding mode; fault current; transformer grounding mode

## 0 引言

配电网中性点接地方式是供电质量、继电保护等方案设计中的关键影响因素。实际配电网的中性点接地方式主要有不接地、经小电阻接地、谐振接地等<sup>[1-4]</sup>。对于不含 DG 的传统配电网, 各种中性点接地方式的优缺点、适用情况以及故障特征都已有完善的研究成果, 已施行各种标准和要求<sup>[5-6]</sup>。但对

于 DG 并网后的有源配电网接地方式不再仅是主网系统接地方式, 还包括并网 DG 的接地方式(由并网变压器接线方式和 DG 本身的接地方式共同决定)<sup>[7]</sup>, 其接地故障特征与并网 DG 的数量、类型(旋转型和逆变型)、接地方式之间的关系分析研究较少<sup>[8]</sup>。

大量 DG 接入配电网, 改变了原配电网的网络结构, 由单端网络变为双端乃至多端有源网络, 网络拓扑结构更为复杂, 这对于配电网的正常运行以及原有继电保护装置的配置产生影响<sup>[9-12]</sup>。对于不接地和经消弧线圈接地方式配电网, 并网 DG 采用不接地方式为最佳选择<sup>[13-14]</sup>。单相接地时系统的故

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52077221); 南方电网公司科技项目资助(046000KK52220008)

障工频/暂态电气量特征均与 DG 并网前相似, 没有根本性变化。现有配电网的过电压和接地保护配置均可继续适用<sup>[15-19]</sup>。但对于小电阻接地配电网, DG 接地方式有多种选择, 可采用不接地、直接接地或小电阻接地方式<sup>[20-21]</sup>, DG 接地方式直接影响系统的零序通路, 进而会导致接地故障特征不同, 这会给原有接地保护的动作性能带来一系列影响<sup>[22-23]</sup>。因此有必要对有源小电阻接地配电网的接地故障特征进行分析, 为原有接地保护性能的改进以及新建含 DG 配电网中的接地保护配置提供一定的理论依据。

本文运用对称分量法以及叠加原理, 构建了含有多个逆变型 DG(inverter-interfaced DG, IIDG)<sup>[24]</sup>和多个旋转型 DG 的配电网单相接地故障分析模型, 并对其故障条件(单相接地位置、DG 数量、DG 类型、DG 接地方式)不同时单相接地故障特征(故障点电流、线路三序电流)进行了较全面的分析。分析 DG 并网后的经小电阻接地配电网的接地故障特征可为不同类型 DG 的并网变压器接地方式的选择和系统继电保护装置的配置提供一定的依据和参考。

### 1 含多 DG 并网的配电网单相接地故障模型

建立含多个、不同接地方式、不同类型 DG 的经小电阻接地方式配电网的单相接地故障分析模型, 当在不同位置发生单相接地故障时可得到复合序网如图 1 所示(不同位置发生单相接地故障体现为图 1 中上游和下游各类 DG 支路的数量不同)。

在进行含 DG 配电网不对称故障分析时, 旋转

型 DG 可等效为一带内阻抗的恒定电压源<sup>[25]</sup>; 逆变型 DG 一般采用 PQ 以及负序分量抑制策略, 可等效为一个恒定的正序电流源<sup>[26-29]</sup>。

图 1 中, 故障点上游有  $m$  个 IIDG、 $n-m$  个旋转型 DG, 下游有  $m'$  个 IIDG、 $n'-m'$  个旋转型 DG。 $Z_{DG1}^+, \dots, Z_{DGn}^+, Z_{DG1'}^+, \dots, Z_{DGn'}^+, Z_{DGm+1}^-, \dots, Z_{DGn}^-$ 、 $Z_{DGm'+1}^-, \dots, Z_{DGn'}^-$ 、 $Z_{DG1}^0, \dots, Z_{DGn}^0, Z_{DG1'}^0, \dots, Z_{DGn'}^0$  分别为故障点上、下游的并网 DG 所在支路的正、负、零序阻抗。 $Z_S^+, Z_S^-, Z_S^0$  分别为配电网主网侧线路的正、负、零序阻抗。 $I_{DG1}^+, \dots, I_{DGn}^+, I_{DG1'}^+, \dots, I_{DGn'}^+$ 、 $I_{DG1}^-, \dots, I_{DGn}^-, I_{DG1'}^-, \dots, I_{DGn'}^-$ 、 $I_{DG1}^0, \dots, I_{DGn}^0, I_{DG1'}^0, \dots, I_{DGn'}^0$  分别为故障点上、下游各并网 DG 所在支路中流通的正、负、零序电流。 $I_1^+, \dots, I_n^+, I_1^-, \dots, I_n^-, I_1^0, \dots, I_n^0, I_1'^0, \dots, I_n'^0$  分别为故障点上下游的各段线路流通的正、负、零序电流。 $I_S^+, I_S^-, I_S^0$  分别为故障点上、下游的配电网主网侧线路中流通的正、负、零序电流。 $U_S^+$  为主网电源电压,  $\dot{U}_{IIDGm+1}, \dots, \dot{U}_{IIDGn}, \dot{U}_{IIDGm'+1}, \dots, \dot{U}_{IIDGn'}$  分别是故障点上、下游的逆变型 DG 等效电压源输出的故障电压分量。 $\Delta \dot{I}_{IIDG1}, \dots, \Delta \dot{I}_{IIDGm}, \Delta \dot{I}_{IIDG1'}, \dots, \Delta \dot{I}_{IIDGm'}$  分别是故障点上、下游的 IIDG 等效电流源输出的故障电流分量, IIDG 所在支路流通的正序电流为等效电流源输出的稳态故障电流,  $\dot{I}_{DG1}^+ = \Delta \dot{I}_{IIDG1}^+$ 、 $\dot{I}_{DG1'}^+ = \Delta \dot{I}_{IIDG1'}^+$ 。

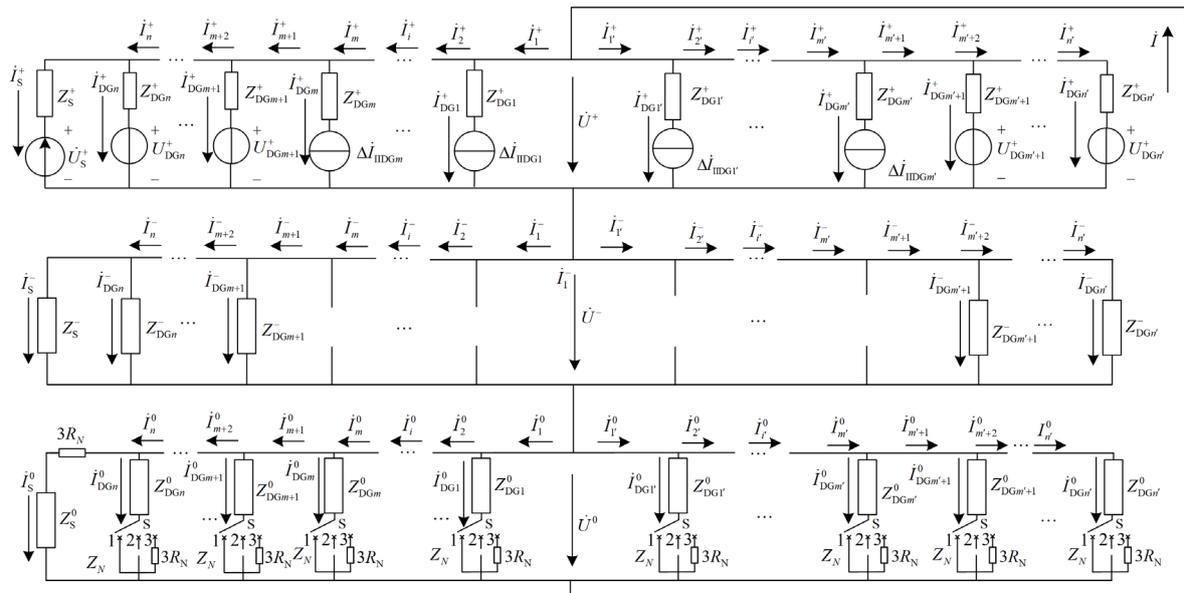


图 1 含多个、不同接地方式、不同类型 DG 经小电阻接地方式配电网单相接地故障复合序网图

Fig. 1 Compound sequence network diagram of single-phase grounding fault in distribution network through low resistance grounding mode and with multiple, different grounding modes and types of DGs

## 2 故障点电流分析

### 2.1 故障点电流和不同 DG 类型的关系

旋转型 DG 并网后会改变系统的正、负、零序阻抗, 从而改变故障点电流的大小。系统的正、负、零序阻抗分别为各支路的正、负、零序阻抗并联。在进行含有 DG 配电网不对称故障分析时, 旋转型 DG 可等效为一带内阻抗的恒定电压源, 并网后会增加正序和负序的支路数量从而减小系统的正、负序阻抗。对系统的零序阻抗而言, 并网 DG 的接地方式为关键因素: 当 DG 的并网变压器为不接地方式时, 在复合序网中可视其零序支路为开路, 从而基本不影响系统零序阻抗; 当 DG 为经小电阻接地或直接接地方式时, 在复合序网中其零序支路为通路, 则系统的零序阻抗会由于并联支路增多而减小, 而且 DG 数量越多(零序支路越多), 系统的零序阻抗越小。故旋转型 DG 并网会使系统的正、负、零三序阻抗之和减小, 从而使故障点电流增大。

逆变型 DG 并网后, 正序支路只有等效电流源, 负序支路开路, 并不影响系统的正、负序阻抗, 而对零序阻抗的影响与上述旋转型 DG 并网时相同。不同于旋转型 DG 的是, 根据单相接地后 IIDG 的控制策略, 其在接地故障时会向系统输送正序无功电流提高并网点电压, 用来减小系统正序电压的跌落幅度, 以达到支撑系统电压的目的<sup>[30]</sup>。故当并网 IIDG 的接地方式为经小电阻接地或直接接地方式且并网点处的正序电压下降远大于不接地时, IIDG 则会输出更大的正序电流, 导致相同条件下并网 DG 为逆变型比为旋转型的接地故障点电流更大。

### 2.2 故障点电流与 DG 接地方式的关系

当并网 DG(无论旋转型还是逆变型)的接地方式不接地时, 故障点电流基本不变, 与 DG 并网前基本一致。

当并网 DG 均为经小电阻接地或直接接地方式时, 复合序网中零序支路为通路, 系统零序阻抗远小于 DG 并网前, 故障点电流远大于 DG 并网前(当 DG 直接接地时, 零序支路阻抗更小, 并联得出的系统总零序阻抗更小, 故障点电流更大), 并网 DG 越多(并联的零序支路越多), 系统零序阻抗越小, 接地故障点电流越大。而且当 DG 均为直接接地方式或经小电阻接地时, 相比于只含旋转型 DG 的配电网, 只含 IIDG 的配电网接地故障点电流更大, 主要是因为此时系统正序电压降落较大, IIDG 会输出较旋转型 DG 更大的电流以达到支撑系统电压的目的。

当并网 DG 的数量固定时, 直接接地方式的比例越大, 系统零序阻抗越小, 故障点电流越大。没

有直接接地方式的 DG 时, 经小电阻接地的比例越大, 系统零序阻抗越小, 故障点电流越大。

### 2.3 故障点电流与接地故障位置的关系

接地故障位置的改变会导致系统总阻抗变化从而改变接地故障点电流, 而系统总阻抗的决定因素有 DG 数量、DG 接地方式、DG 类型、接地故障点位置等。例如, 当故障点位于含 DG 线路的末端或不含 DG 线路时, 所有 DG 支路均位于故障点上游, 此时随着故障点逐渐远离母线, 故障点上游线路阻抗逐渐增加导致系统阻抗逐渐增加, 故障点电流会逐渐减小。

## 3 线路各序电流分析

### 3.1 正负序电流分析

旋转型 DG 的正、负序阻抗均很大, 系统中的正、负序电流主要流经主网侧, DG 所在支路流通的正、负序电流很小, 故可近似相等, 即

$$\begin{cases} \dot{I}_{DGm+1}^+ \approx \dots \approx \dot{I}_{DGn}^+ \approx \dot{I}_{DGm'+1}^+ \approx \dots \approx \dot{I}_{DGn'}^+ \\ \dot{I}_{DGm+1}^- \approx \dots \approx \dot{I}_{DGn}^- \approx \dot{I}_{DGm'+1}^- \approx \dots \approx \dot{I}_{DGn'}^- \end{cases} \quad (1)$$

IIDG 所在支路的正序电流为发生不对称故障时等效电流源输出的稳态故障电流,  $\dot{I}_{DGi}^+ = \Delta \dot{I}_{IIDGi}^+$ ,  $\dot{I}_{DGi'}^+ = \Delta \dot{I}_{IIDGi'}^+$ , 复合序网中负序支路断路, 无负序电流流通。

电源侧正、负序电流  $\dot{I}_s^+$ 、 $\dot{I}_s^-$  为

$$\begin{cases} \dot{I}_s^+ = \dot{I}_f^+ - \sum_{i=1}^n \dot{I}_{DGi}^+ - \sum_{i'=1}^{n'} \dot{I}_{DGi'}^+ \\ \dot{I}_s^- = \dot{I}_f^- - \sum_{i=m+1}^n \dot{I}_{DGi}^- - \sum_{i'=m'+1}^{n'} \dot{I}_{DGi'}^- \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\dot{I}_f^+$ 、 $\dot{I}_f^-$  分别为故障点处正、负序电流。故接地故障电流的正、负序分量主要流经主网侧线路, DG 所在支路流通的正、负序电流很小。

### 3.2 零序电流分析

#### 1) 零序电流的分布

配电网中 DG 支路有无零序电流流通(复合序网中 DG 零序支路是否断路)以及流通的电流大小, 决定因素为其所在支路 DG 的接地方式。当并网 DG 不接地时, 复合序网中其所在零序支路断路, 无零序电流流通, 零序电流在系统中的分布与 DG 并网前一致。DG 为经小电阻接地或直接接地方式时, 复合序网中其所在零序支路有零序电流流通, DG 经小电阻接地时所在支路流通的零序电流小于 DG 直接接地时, 故障点零序电流(各支路零序电流之和)相比于 DG 并网前大幅增加。根据图 1 对各区段线路(两并网 DG 并网点之间的线路)中流通的零序电流进行如下分析。

(1) 故障点上游各区段线路的零序电流可表示为

$$i_i^0 = i_{i+1}^0 + i_{DG_i}^0 = i_s^0 + \sum_{j=i}^n i_{DG_j}^0 \quad (3)$$

当并网 DG 均为不接地方式时, 复合序网中 DG 所在零序支路断路, 不流通零序电流。故障线路上游区段线路流通的零序电流近似相等,  $i_i^0 = i_s^0$ 。

当并网 DG 均为经小电阻接地方式或是直接接地方式时, 故障点上游任一区段流通的零序电流  $i_i^0$  由该区段上游并网 DG 数量以及并网 DG 的接地方式等因素共同决定, 并网 DG 越多、直接接地方式并网 DG 所占比例越大, 该区段上游总零序阻抗越小, 流通的零序电流越大。含有并网 DG 的非故障线路(故障点上游)中某一区段流通的零序电流由该非故障线路区段下游线路并网 DG 数量以及并网 DG 的接地方式等因素共同决定, 并网 DG 越多、直接接地方式并网 DG 所占比例越大, 该区段下游总零序阻抗越小, 流通的零序电流越大。

(2) 故障点下游各段线路的零序电流可表示为

$$i_r^0 = i_{r+1}^0 + i_{DG_r}^0 = \sum_{j=r}^n i_{DG_j}^0 \quad (4)$$

当并网 DG 均不接地时, 复合序网中故障点下游零序支路均断路, 不流通零序电流。

当并网 DG 的接地方式均为经小电阻接地或直接接地方式时, 故障点下游任一区段流通的零序电流  $i_r^0$  由该区段下游并网 DG 数量以及并网 DG 的接地方式等因素共同决定, 并网 DG 越多、直接接地方式并网 DG 所占比例越大, 该区段下游总零序阻抗越小, 流通的零序电流越大。

2) 零序电流随故障位置的变化

接地故障点零序电流如式(5)所示。

$$i_f^0 = \frac{\dot{U}_f}{Z_\Sigma^+ + Z_\Sigma^- + Z_\Sigma^0} = i_1^0 + i_r^0 \quad (5)$$

式中:  $i_f^0$  为故障点处零序电流;  $\dot{U}_f$  为故障点故障前反相电压;  $Z_\Sigma^+$ 、 $Z_\Sigma^-$ 、 $Z_\Sigma^0$  分别为配电网系统正、负、零序总阻抗;  $i_1^0$ 、 $i_r^0$  分别为故障点上、下游靠近故障点的首段线路流通的零序电流(即从故障点处分流向上、下游的零序电流),  $i_1^0$  与  $i_r^0$  的幅值比为故障点上、下游零序阻抗的阻抗反比。

假设分流流向上游的零序电流  $i_1^0$  占故障点处总零序电流  $i_f^0$  的比例为  $k_0$ , 则  $i_1^0 = k_0 i_f^0$ 。随故障点位置远离母线, 上游分流比由  $k_0$  变为  $k_0(1 - \Delta k_0)$ , 其中  $\Delta k_0$  为  $k_0$  变化量,  $\Delta k_f$  为一实数, 故障点零序电流变为  $(1 + \Delta k_f) i_f^0$ , 故障点上游零序电流变为  $k_0(1 - \Delta k_0)(1 + \Delta k_f) i_f^0$ , 当  $(1 - \Delta k_0)(1 + \Delta k_f) > 1$ , 即

$\Delta k_f - \Delta k_0 - \Delta k_0 \Delta k_f > 0$  时, 故障点上游零序电流随故障点位置远离母线增大。相反, 当  $\Delta k_f - \Delta k_0 - \Delta k_0 \Delta k_f < 0$  时, 故障点上游零序电流随故障点位置远离母线减小。具体到上、下游某一零序支路的零序电流随故障点位置远离母线的变化规律时, 因为每一支路的分流比例不变, 所以上、下游某一支路的零序电流变化规律与其所在的上、下游的总零序电流变化规律一致。

当接地故障点无下游时, 即接地故障发生在所有并网 DG 下游时, 接地故障点上游零序电流即故障点零序电流大小随故障点位置远离母线减小, 各并网 DG 所在支路的零序电流变化规律同故障点处的零序电流的变化规律。

#### 4 仿真验证

为了验证上述对含多个、不同类型、不同接地方式并网 DG 的经小电阻接地方式配电网单相接地故障的理论分析, 利用 Matlab/Simulink 搭建了 10 kV 小电阻配电网的单相接地故障仿真模型, 如图 2 所示。

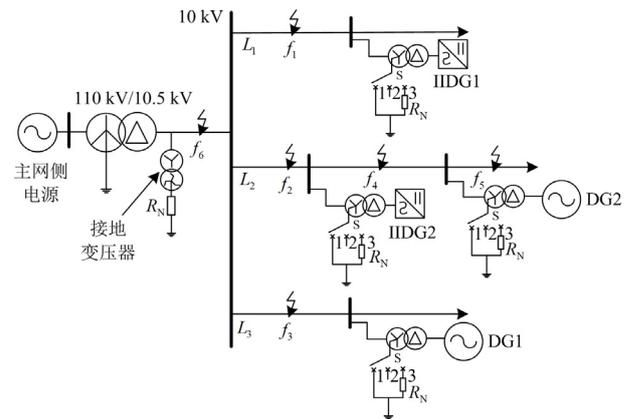


图 2 含多并网 DG 的经小电阻接地 10 kV 配电网

Fig. 2 Low resistance grounding 10 kV distribution network with multiple grid-connected DGs

图 2 中, 主网变压器额定容量为 100 MVA, 电压变比为 110 kV/10.5 kV, 阻抗电压百分值  $U_k$  为 8%, 主网侧接地变压器容量为 3 MVA, 旋转型 DG 并网变压器的额定容量为 3 MVA, 变比为 10.5 kV/0.575 kV, 逆变型 DG 并网变压器的额定容量为 3 MVA, 变比为 10.5 kV/0.4 kV, 旋转型和逆变型 DG 的并网变压器阻抗电压百分值  $U_k$  均为 2.5%, 线路均采用电缆线路, 每条出线的电缆线路的长度均为 10 km, 线路每千米正序电阻为 0.28  $\Omega$ 、正序电感为 0.26 mH、正序电容为 0.38  $\mu\text{F}$ , 每千米零序电阻为 2.80  $\Omega$ 、零序电感为 1.11 mH、零序电容为

0.28  $\mu\text{F}$ , 所有的接地小电阻阻值均为  $10 \Omega$ 。在 0.15 s 时发生 A 相接地故障。

#### 4.1 故障点电流分析的仿真验证

以  $f_2$  点发生单相接地故障为例, DG 并网情况分别为 1 个旋转型 DG、1 个 IIDG、2 个旋转型 DG、2 个 IIDG, 且所有并网 DG 的接地方式一致时(以均为直接接地方式为例), 各情况的故障点电流幅值如表 1 所示。

表 1 故障点固定时不同并网情况下故障点电流幅值  
Table 1 Fault point current amplitude under different grid-connected conditions, when the fault point is fixed

并网 DG 数量	并网 DG 为旋转型 故障点电流幅值/kA	并网 DG 为逆变型 故障点电流幅值/kA
1	1.672	1.727
2	2.035	2.360

对表 1 进行分析, 可得出当故障点位置为  $f_2$  且固定时, 并网 DG 数量一致且接地方式均相同(均为直接接地方式)时, 并网 DG 为逆变型时的故障点电

流更大。随着并网 DG 数量的增加, 故障点电流增大, 这与上述 2.1 节的理论分析结果相一致。

当接地故障点位置、并网 DG 数量、并网 DG 类型和并网 DG 接地方式等条件均不同时, 各情况的故障点电流幅值如表 2 所示。

对表 2 进行分析, 当故障点位置固定不变、DG 的并网情况变化时: 不接地 DG(旋转型或逆变型)的并网对故障点电流影响不大, 无论并网 DG 的类型以及数量的增多或减少, 故障点电流与 DG 并网前基本一致。经小电阻接地或直接接地方式的 DG 并网后的故障点电流远大于 DG 并网前, 已并网的 DG 并网位置和接地方式不变, 增加经小电阻接地或直接接地方式的 DG 并网数量, 故障点电流将会明显增大。当并网 DG 数量不变时, 直接接地方式并网 DG 数量所占比例越大(若无直接接地方式 DG 则经小电阻接地的并网 DG 数量比例越大), 故障点电流越大。这与上述 2.2 节的理论分析结果相一致。

表 2 各种情况下故障点电流幅值

Table 2 Fault point current amplitude in various cases

DG 并网情况	kA					
	故障点为 $f_1$ 故障点电流幅值	故障点为 $f_2$ 故障点电流	故障点为 $f_3$ 故障点电流幅值	故障点为 $f_4$ 故障点电流幅值	故障点为 $f_5$ 故障点电流幅值	故障点为 $f_6$ 故障点电流幅值
无并网 DG	0.391	0.391	0.391	0.363	0.338	0.407
1 个不接地旋转 DG 1 个不接地 IIDG	0.390	0.390	0.392	0.362	0.338	0.406
1 个小电阻接地旋转 DG 1 个小电阻接地 IIDG	1.230	1.190	1.229	0.955	0.819	1.300
1 个直接接地旋转 DG 1 个直接接地 IIDG	2.360	2.010	2.340	1.425	1.101	2.469
2 个不接地旋转 DG 2 个不接地 IIDG	0.386	0.387	0.388	0.360	0.336	0.402
2 个小电阻接地旋转 DG 2 个小电阻接地 IIDG	1.528	1.487	1.527	1.391	1.136	1.790
2 个直接接地旋转 DG 2 个直接接地 IIDG	2.727	2.445	2.713	2.091	1.635	2.766

当 DG 并网情况为 IIDG1 直接接地、IIDG2 直接接地或旋转型 DG1 直接接地、IIDG1 直接接地两种情况, 且故障点由  $f_4$  点逐渐远离母线时, 各情况的故障点电流幅值如表 3 所示。

对表 3 进行分析, 两种并网情况均为所有 DG 位于故障点上游, 故障点位于含 DG 线路的末端或不含 DG 线路, 随着故障点由  $f_4$  点逐渐远离母线, 故障点电流逐渐减小。当配电网系统中有多组并网 DG 且并网情况(并网位置、DG 接地方式、DG 类型)较复杂时, 故障点电流大小与故障点位置无明显相关性, 需根据具体的 DG 并网情况具体分析。这与上述 2.3 节的理论分析结果相一致。

表 3 故障点逐渐远离母线时故障点电流幅值

Table 3 Current amplitude of the fault point when the fault point is gradually away from the busbar

故障点距离母线距离/km	故障点电流幅值/kA	
	IIDG1、IIDG2	DG1、IIDG1
4	1.873	1.462
5	1.575	1.270
6	1.359	1.128
7	1.194	1.016
8	1.065	0.923

#### 4.2 故障点电流分析的仿真验证

以  $f_2$  点发生单相接地故障为例, DG 并网情况

为 DG1(旋转型)直接接地、DG2(旋转型)直接接地、IIDG1 不接地、IIDG2 经小电阻接地。各并网 DG 所在支路以及主网侧线路中流通的正、负、零序电流如图 3 所示。

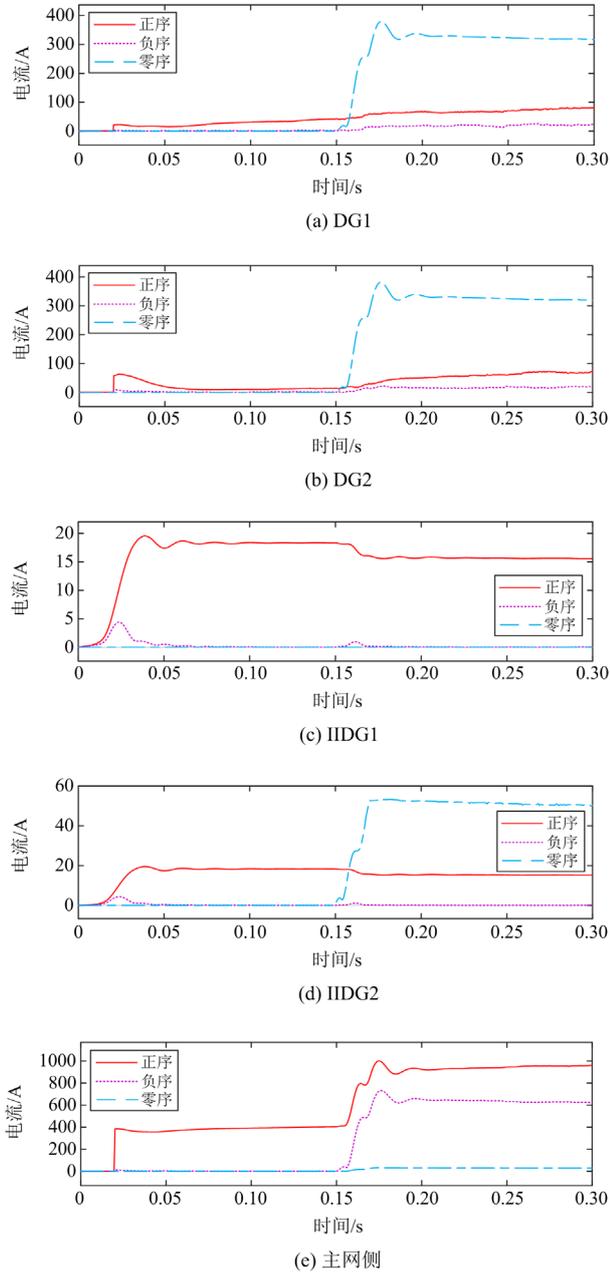


图 3  $f_2$  发生单相接地故障时各 DG 支路和主网侧的三序电流

Fig. 3 Three-sequence current of each DG branch and the main grid side when a single-phase grounding fault occurs in  $f_2$

可以看出旋转型 DG 所在支路流通的正序和负序电流与主网侧的相比均很小, IIDG 的正序稳态电流为恒流, 无负序电流流通, 故障电流的正、负序

分量主要流经主网侧线路。IIDG1 不接地, 所在支路无零序电流流通, IIDG2、DG1 和 DG2 接地, 零序电流主要流经 DG1 和 DG2(直接接地方式并网 DG)所在支路, 流经 IIDG2(经小电阻接地方式并网 DG)的零序电流较小。这与上述 3.1 节和 3.2 节的理论分析结果相一致。

### 5 结论

含多个、不同类型、不同接地方式并网 DG 的经小电阻接地配电网接地故障点电流随经小电阻接地或直接接地方式 DG 数量的增加而增大(尤其是直接接地 DG 数量); 随故障点位置改变时, 若故障点位置的改变令系统正、负、零序阻抗之和增大, 则故障点电流减小, 若阻抗之和减小, 则故障点电流增大。不接地 DG 并网后, 配电网发生单相接地故障, 故障点电流大小基本不变, 零序网络无变化, 各段线路中流通的零序电流较 DG 并网前大小基本不变, 这对系统出线处原有的基于零序电流原理的选线装置的影响最小, 所以 DG 应尽量选择不接地方式来进行并网。

### 参考文献

[1] 李金东, 王勇, 王猛, 等. 基于二次扰动的配电网单相接地故障有源电流消弧方案[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 72-78.  
 LI Jindong, WANG Yong, WANG Meng, et al. An active current arc suppression method for single-phase grounding faults in the distribution network based on secondary current disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 72-78.  
 [2] 吴丽芳, 白浩, 欧阳健娜, 等. 基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(5): 109-114.  
 WU Lifang, BAI Hao, OUYANG Jianna, et al. Accurate measurement method of distribution network-to-ground capacitance based on graded adjustment of grounding transformer windings[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 109-114.  
 [3] 李响, 张炜祺, 赵瑞锋, 等. 小电阻接地系统弧光接地故障建模与特征计算方法[J]. 供用电, 2022, 39(6): 27-32, 39.  
 LI Xiang, ZHANG Weiqi, ZHAO Ruifeng, et al. Modeling and characteristic calculation method of arc ground fault in low resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(6): 27-32, 39.  
 [4] 董新涛, 李文伟, 李宝伟, 等. 基于补偿零序压差原理的 110 kV 线路纵向故障保护方案[J]. 智慧电力, 2022,

- 50(9): 110-117.  
DONG Xintao, LI Wenwei, LI Baowei, et al. 110 kV line longitudinal fault protection scheme based on compensated zero sequence voltage differential principle[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 110-117.
- [5] 郭丽伟. 含分布式电源的小电阻接地方式配电网接地故障分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
GUO Liwei. Single line-to-ground fault analysis for a low-resistance grounding distribution system with distributed generations[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [6] 吴娜, 刘子晖, 樊淑娴. 基于 Pearson 相关性的小电阻接地有源配电网接地保护[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 136-143.  
WU Na, LIU Zihui, FAN Shuxian. Grounding protection of low resistance grounding active distribution network based on Pearson correlation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 136-143.
- [7] 薛永端, 郭丽伟. 关于有源配电网接地方式的探讨[J]. 供用电, 2015(6): 6-11.  
XUE Yongduan, GUO Liwei. Discussion about grounding mode of active distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2015(6): 6-11.
- [8] GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Discussion about neutral grounding mode of active distribution network[C]// China International Conference on Electricity Distribution (CICED), December 22, 2014, Shenzhen, China: 1033-1036.
- [9] 杨晶晶, 林凡勤, 周成瀚, 等. 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 116-123.  
YANG Jingjing, LIN Fanqin, ZHOU Chenghan, et al. Comparison protection method of current sequence components for feeder with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 116-123.
- [10] 尚璿, 邵能灵, 刘琦, 等. 考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 40-45, 52.  
SHANG Jin, TAI Nengling, LIU Qi, et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 40-45, 52.
- [11] 赵东明. 分布式电源对配网继电保护的影响[J]. 自动化应用, 2023, 64(20): 36-37.  
ZHAO Dongming. Influence of distributed power sources on distribution network relay protection[J]. Automation Application, 2023, 64(20): 36-37.
- [12] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 2-9.  
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection control applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 2-9.
- [13] 陶维青, 李雪婷, 华玉婷, 等. 基于曼哈顿平均距离和余弦相似度的配网单相接地故障定位[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 130-138.  
TAO Weiqing, LI Xueting, HUA Yuting, et al. Fault location of single-phase grounding fault based on Manhattan average distance and cosine similarity in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 130-138.
- [14] 薛永端, 郭丽伟, 张林利, 等. 有源配电网中性点接地方式的选择问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 129-136.  
XUE Yongduan, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problems of neutral grounding mode in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 129-136.
- [15] 李琰, 赵莹, 杜磊, 等. 计及分布式电源注入谐波的单相接地故障联合选线[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 113-121.  
LI Yan, ZHAO Ying, DU Lei, et al. Combined line selection of single-phase grounding faults considering harmonic injection of distributed powers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 113-121.
- [16] LI Jiang, GAO Ming, LIU Bo, et al. Fault location algorithm in distribution networks considering distributed capacitive current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(05): 2785-2793.
- [17] 钱虹, 黄正润, 阮大兵. 含 DG 的小电流接地系统单相接地故障定位[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 17-23.  
QIAN Hong, HUANG Zhengrun, RUAN Dabing. Single phase-to-earth fault location of small current grounding system with distributed generation[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 17-23.
- [18] 李卫彬, 童欣, 黄超, 等. 基于分层定位模型的含 DG 配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 160-166.  
LI Weibin, TONG Xin, HUANG Chao, et al. A fault location method for a distribution network with DG based on a hierarchical location model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 160-166.
- [19] 祁言嘉, 王宝华. 含逆变型分布式电源的配电网自适应电流保护[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7151-7158.  
QI Yanjia, WANG Baohua. Adaptive current protection for distribution network with inverter interfaced distributed

generation[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7151-7158.

[20] 沈茜, 金鹏, 胡国. 计及逆变型分布式电源的有源配电网单相接地故障分析[J]. 可再生能源, 2020, 38(7): 940-947. SHEN Qian, JIN Peng, HU Guo. Analysis on single-phase earth fault of active distribution network containing inverter interfaced distributed generator[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(7): 940-947.

[21] 乔一达, 吴红斌, 吴通华, 等. 含分布式电源的小电阻接地系统分区域零序保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 186-194. QIAO Yida, WU Hongbin, WU Tonghua, et al. Regionalized zero-sequence protection for low-resistance grounded system with distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 186-194.

[22] CHENG Liang, WANG Tao, WANG Yi. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 698-708.

[23] 王宁, 韩国栋, 高厚磊, 等. 有源配电网电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 14-23. WANG Ning, HAN Guodong, GAO Houlei, et al. The current differential protection criterion of active distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 14-23.

[24] 顾大德, 肖健, 韦梦立, 等. 含逆变型分布式电源的花瓣型配电网故障定位策略研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 53-59. GU Dade, XIAO Jian, WEI Mengli, et al. Research on fault location strategy for petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 53-59.

[25] 郭丽伟, 薛永端, 张林利, 等. 含分布式电源的小电阻接地方式配电网单相接地故障分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 116-123. GUO Liwei, XUE Yongduan, ZHANG Linli, et al. Analysis of single-phase earth fault in low resistance grounded distribution network containing DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 116-123.

[26] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 含逆变型分布式电源的小电阻接地方式配电网单相接地故障分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(16): 57-63, 71. XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Earth fault analysis on low resistance grounded distribution network with inverter interfaced distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(16): 57-63, 71.

[27] 徐岩, 邹南, 马天祥. 逆变型分布式电源接入配电网单相断线故障零序电压分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 41-51. XU Yan, ZOU Nan, MA Tianxiang. Analysis of zero-sequence voltage of a single-phase disconnection fault of inverter interfaced distributed generation connected to a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 41-51.

[28] 黄瑶玲, 杨楠, 刘浔, 等. 分布式光伏电源接入对配电网影响[J]. 电工材料, 2022(1): 78-80. HUANG Yaoling, YANG Nan, LIU Xun, et al. Impact of distributed photovoltaic power access on distribution network[J]. Electrical Engineering Materials, 2022(1): 78-80.

[29] 董玉辉. 分布式光伏接入配电网继电保护研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(3): 91-93.

[30] 陈桥山. 含逆变型分布式电源配电网故障选线方案研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. CHEN Qiaoshan. Studies on faulty feeder selection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-04-02

作者简介:

田君杨(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护与优化运行; E-mail: sumtjy@163.com

李海勇(1981—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为继电保护技术与运用。E-mail: li\_hy.dd@gx.csg.cn

(编辑 张颖)