

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181069

## 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护

杨晶晶<sup>1</sup>, 林凡勤<sup>1</sup>, 周成瀚<sup>2</sup>, 邹贵彬<sup>2</sup>, 李颖超<sup>2</sup>, 乔珊<sup>2</sup>

(1. 国网潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 分布式电源的接入对传统配电网保护带来了严重的影响。此外, 逆变型 DG 的故障特性以及系统的故障穿越电流均会影响到常规纵联保护的动作性能。对此, 提出了一种含 DG 馈线的电流序分量比较式保护。针对非对称性故障, 根据保护区域两侧负序电流的相位差异, 构造了负序电流相位比较式保护判据。针对对称性故障, 根据系统侧与 DG 侧提供短路电流的大小差异, 构造了正序电流幅值比较式保护判据。基于上述保护原理, 开发了保护样机, 仿真分析与动模测试结果验证了所提含 DG 馈线保护的有效性。

**关键词:** 负序电流相位; 正序电流幅值; 分布式电源; 馈线

### Comparison protection method of current sequence components for feeder with distributed generation

YANG Jingjing<sup>1</sup>, LIN Fanqin<sup>1</sup>, ZHOU Chenghan<sup>2</sup>, ZOU Guibin<sup>2</sup>, LI Yingchao<sup>2</sup>, QIAO Shan<sup>2</sup>

(1. State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The integration of Distributed Generations (DGs) has great impact on the traditional distribution network protection. In addition, the fault characteristics of the inverter-interfaced DG and the through-fault current of the system affect the performance of the conventional pilot protection. Therefore, a new comparison protection method using current sequence components for feeder with DG is proposed. According to the phase difference of the negative-sequence current on both sides of the protection zone, the negative-sequence current phase comparison criterion is constructed for asymmetrical faults. As for symmetrical faults, the positive-sequence current magnitude comparison criterion is proposed based on the magnitude difference of the fault current provided by the system and the DG. Based on above protection principles, a protection prototype is developed. Extensive simulation in PSCAD software and practical tests with the protection prototype verify the effectiveness of the proposed protection method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSDWF00FCJS1800398).

**Key words:** phase of negative sequence current; amplitude of positive sequence current; distributed generation; feeder

## 0 引言

随着化石能源的短缺、电力电子技术的发展和国民经济对电能需求的增加, 大量分布式电源 (Distributed Generation, DG) 接入配电网, 给传统配电网的保护与控制带来了巨大挑战<sup>[1-2]</sup>。传统配电网是由单一电源供电的辐射型网络, 其保护相对简单。但是 DG 的接入使得配电网变为潮流双向流动的复杂网络<sup>[3-5]</sup>。而且, 不同类型 DG 的故障特性不同, 短路电流的特征也受 DG 本身控制策略的影响, 这

些特性使得传统配网保护方法的灵敏度发生变化, 甚至出现拒动或误动现象<sup>[6-14]</sup>。

为了保证含 DG 配电网的安全运行, 提高供电质量, 必须研究适用于含 DG 配电网的保护方法。基于此, 国内外学者对含 DG 配电网保护进行了深入研究。文献[15-16]将输电网的保护方法应用于有源配电网, 通过比较区段两侧开关处的故障功率方向来定位故障区段, 但需要在各馈线开关处安装电压互感器以检测功率方向。文献[17]在传统保护方法的基础上进行了改进, 提出了自适应电流保护整定的方案。该方案利用复合序电压求得保护安装处

的电流整定值, 进行自适应动作判别, 但该保护方法只适用于含特定控制策略光伏电源的配电网, 且需安装电压互感器。文献[18-20]利用能够反映所有类型故障的正序故障电流分量, 分别构造了基于正序故障电流幅值与相位的保护判据, 但均未考虑故障时穿越电流的影响。文献[21-22]利用故障后电流相角突变量的特征构造保护判据, 但未考虑负荷与 DG 故障特性的影响。

本文首先分析了含 DG 馈线中正、负序电流的故障特性, 得到不对称故障时负序故障电流相位与对称故障时正序电流幅值的特征。在此基础上提出了适用于含 DG 馈线的电流序分量比较式保护方法。针对不对称故障与对称性故障, 分别构造了负序电流相位比较式保护判据与正序电流幅值比较式保护判据。该保护方法不受故障穿越电流与 DG 控制策略等因素的影响。最后, 通过 PSCAD 仿真分析与动模测试验证了该保护方法的有效性。

## 1 含 DG 馈线的短路电流特征

DG 的接入使得传统配电网由单电源辐射型结构变为功率双向流动的多电源结构, 配电网潮流和短路电流的大小、方向及分布特性都发生了实质性的变化。

不失一般性, 由如图 1 所示含 DG 的 10 kV“手拉手”两端配网模型分析含 DG 馈线的短路电流特征。故障点  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别位于 B2-B3、B3-B4、B1-B2 区段。S<sub>ij</sub> 为分段开关, 其中 S32 为联络开关, 正常运行时处于断开状态。

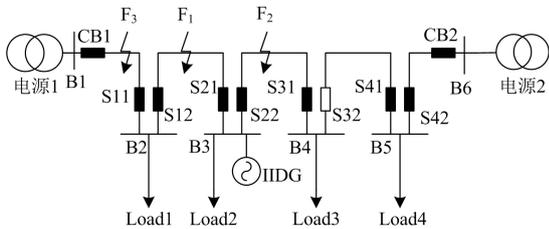


图 1 含 DG 馈线模型

Fig. 1 Schematic of feeder with DG

考虑到我国配电网采用中性点非有效接地, 本文中仅针对相间短路及相间接地故障。在含 DG 馈线中发生不对称故障时, 由于过渡电阻和负荷阻抗的影响, 电源提供的故障电流可能不会全部流入故障点, 存在部分电流越过故障点流向非故障区段形成穿越电流。穿越电流会影响系统全电流与正序电流的大小和相位, 甚至导致基于这些电气量的保护

方法失效。由于全电流特性与正序电流特性相似, 以图 1 所示馈线中  $F_1$  点故障时的正序网络为例, 分析穿越电流对故障电流的影响。以馈线 B2-B3 为被保护对象, 若  $F_1$  点发生不对称故障, 其正序网络如图 2 所示, 其中 IIDG 以电流源代替。

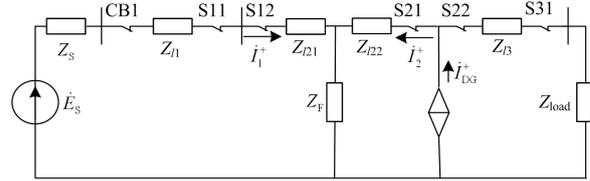


图 2  $F_1$  点发生不对称故障时的正序网络图

Fig. 2 Positive-sequence network of asymmetric fault at  $F_1$

由叠加定理<sup>[23]</sup>, 图 2 可分解为如图 3 所示的系统电源单独作用时的正序网络和如图 4 所示的 DG 单独作用时的正序网络。

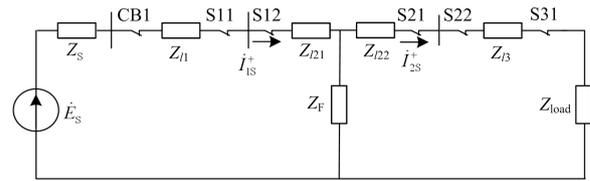


图 3 系统电源单独作用时的正序网络图

Fig. 3 Positive-sequence network under the effect of system source

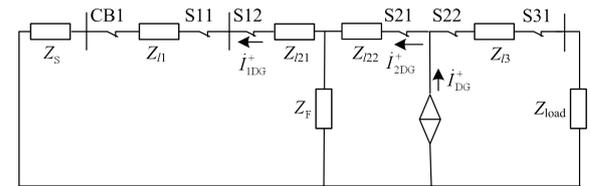


图 4 DG 单独作用时的正序网络图

Fig. 4 Positive-sequence network under the effect of the DG

规定电流正方向为母线指向线路, 由叠加定理可知, 流过故障点上、下游开关 S12 与 S21 的正序电流  $i_1^+$ 、 $i_2^+$  分别为

$$i_1^+ = i_{1s}^+ - i_{1DG}^+ \quad (1)$$

$$i_2^+ = -i_{2s}^+ + i_{2DG}^+ \quad (2)$$

式中:  $i_{1s}^+$  与  $i_{2DG}^+$  分别为系统电源与 DG 提供的短路电流;  $i_{2s}^+$  与  $i_{1DG}^+$  分别为系统电源与 DG 单独作用时提供的穿越电流。由式(1)、式(2)可知, 穿越电流  $i_{2s}^+$  与  $i_{1DG}^+$  的大小与方向会影响  $i_1^+$  与  $i_2^+$  的大小与方向: 若  $|i_{2s}^+| < |i_{2DG}^+|$  且  $|i_{1DG}^+| < |i_{1s}^+|$ , 则  $i_1^+$  与  $i_2^+$  均为正方

向, 此时故障区段两端正序电流方向相同; 若  $|i_{2S}^+| > |i_{2DG}^+|$  而  $|i_{1DG}^+| < |i_{1S}^+|$ , 则  $i_1^+$  为正方向,  $i_2^+$  为反方向, 即系统侧提供的电流发生穿越, 此时故障区段两端正序电流方向相反; 若  $|i_{2S}^+| < |i_{2DG}^+|$  而  $|i_{1DG}^+| > |i_{1S}^+|$ , 则  $i_1^+$  为反方向,  $i_2^+$  为正方向, 此时故障区段两端电流方向也相反。由以上分析可知, 穿越电流的大小会影响故障区段两端正序电流的大小与相位, 使其失去规律性, 进而导致基于正序电流的保护失效。

根据图 3、图 4 可得

$$i_{1S}^+ = \frac{\dot{E}_S}{Z_S + Z_{11} + Z_{121} + [Z_F // (Z_{load} + Z_{13} + Z_{122})]} \quad (3)$$

$$i_{2S}^+ = \frac{Z_F}{Z_{load} + Z_{13} + Z_{122} + Z_F} i_{1S}^+ \quad (4)$$

$$i_{2DG}^+ = \frac{(Z_{load} + Z_{13}) i_{1DG}^+}{[(Z_S + Z_{11} + Z_{121}) // Z_F] + Z_{122} + Z_{13} + Z_{load}} \quad (5)$$

$$i_{1DG}^+ = \frac{Z_F}{Z_S + Z_{11} + Z_{121} + Z_F} i_{2DG}^+ \quad (6)$$

式中:  $\dot{E}_S$  为系统电压;  $i_{1DG}^+$  为 DG 提供的短路电流;  $Z_S$  为系统等值阻抗;  $Z_{11}$ 、 $Z_{13}$  分别为线路 B1-B2、B3-B4 正序阻抗;  $Z_{121}$ 、 $Z_{122}$  分别为故障线路两端 B2、B3 到故障点的正序阻抗;  $Z_F$  为过渡电阻;  $Z_{load}$  为负荷阻抗。

由式(3)~式(6)可知, 穿越电流  $i_{2S}^+$  与  $i_{1DG}^+$  的大小受到系统电源、DG、负荷及过渡电阻的影响。  
① 若馈线中负荷、过渡电阻较小且 DG 容量较大时, 则有  $|i_{2S}^+| < |i_{2DG}^+|$  且  $|i_{1DG}^+| < |i_{1S}^+|$ , 此时故障区段两端的正序电流  $i_1^+$ 、 $i_2^+$  方向相同且均为正; ② 若配电网接有重负荷、经大过渡电阻接地且 DG 容量较小时, 则会出现穿越电流  $i_{2S}^+ \approx i_{1S}^+$  且  $|i_{2S}^+| \gg |i_{2DG}^+|$  的情况, 此时  $i_1^+$  方向为正,  $i_2^+$  方向为负, 较大的穿越电流使故障区段两端正序流方向相反, 与非故障区段两端正序电流的特征类似。因此, 当穿越电流较大时, 传统电流纵联差动保护的灵敏度将会降低甚至拒动。

## 2 电流序分量比较式保护

为解决因大穿越电流而导致含 DG 馈线的保护拒动问题, 本文提出了一种利用电流序分量比较式保护方法。

### 2.1 负序电流相位比较式保护

由于电网中的故障大部分为非对称性的, 非对

称故障产生的负序电流不受穿越电流的影响, 因此可采用基于负序电流的保护原理来检测含 DG 馈线中发生的不对称故障。

在图 1 所示模型中, 当线路 B2-B3 中点  $F_1$  发生非对称故障时, 其负序网络如图 5 所示。由于现有的 IIDG 控制系统通常采用消除负序电流的控制策略, 因此负序网络中无分布式电源, 全部负序电流均由故障点附加的负序电源  $\dot{U}_F^-$  提供, 在研究基于负序电流的保护方法时无需考虑穿越电流的影响。

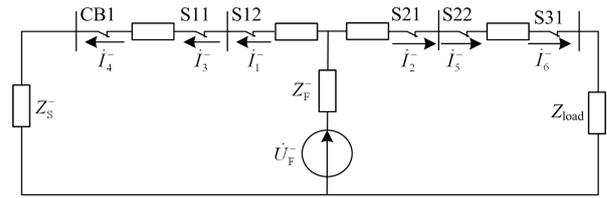


图 5  $F_1$  点发生不对称故障时的负序网络图

Fig. 5 Negative-sequence network of asymmetric fault at  $F_1$

在图 5 中,  $i_1^- \sim i_6^-$  分别为流过开关 S12、S21、S11、CB1、S22 和 S31 的负序电流。可以看出  $i_1^-$ 、 $i_2^-$ 、 $i_4^-$  与  $i_6^-$  的方向均为负, 而  $i_3^-$  与  $i_5^-$  的方向为正。即故障区段两端负序电流方向相同, 非故障区段两端负序电流方向相反。因此, 可利用负序电流的相位特征构造保护判据。设流过同一区段两端开关的负序电流相位分别为  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ , 设置负序电流相位差为

$$\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2| \quad (7)$$

由上述分析得, 对故障区段有:  $\Delta\phi = 0^\circ$ ; 非故障区段有:  $\Delta\phi = 180^\circ$ 。

由于实际系统、互感器以及保护装置等均会产生误差, 从而导致相位差  $\Delta\phi$  的计算值与理论值存在一定的偏差。故引入裕度角  $\theta$ , 由此得到如下所示的负序电流相位比较式保护判据:

$$\begin{cases} 180^\circ - \theta < \Delta\phi < 180^\circ + \theta \rightarrow \text{非故障区段} \\ 0^\circ < \Delta\phi < \theta \rightarrow \text{故障区段} \end{cases} \quad (8)$$

考虑到各种影响因素及其误差, 文中裕度角  $\theta$  取值  $(0, 90^\circ)$ 。

### 2.2 正序电流幅值比较式保护

由于负序电流只存在于不对称故障中, 当线路发生对称性故障时, 负序电流相位比较式保护原理将会失效。虽然对称性故障发生的概率很低, 但仍有必要针对对称性故障引入辅助保护判据。

以图2所示的正序网络图分析F<sub>1</sub>点发生对称故障时的正序电流特征。由于线路发生三相短路故障时故障点的电压跌落到零, 此时系统电源提供的短路电流均流入故障点, 而不会越过故障点向下游非故障侧流动。因此, 流过故障点上游开关S12处的正序电流 $I_1^+$ 变为

$$I_1^+ = I_{1S}^+ \quad (9)$$

由于F<sub>1</sub>点电压降落至零, 此时位于母线下游的DG将退出运行, 此时流过故障点下游开关S21的正序电流 $I_2^+$ 为零; 若DG为计划性孤岛, 故障后不退出运行而继续为下游供电, 此时DG提供的短路电流同样全部流入故障点, 不会越过故障点向上游非故障侧流动。因此流过开关S21的正序电流 $I_2^+$ 变为

$$\begin{cases} I_2^+ = 0 & \text{DG退出} \\ I_2^+ = I_{2DG}^+ & \text{计划性孤岛} \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)、式(10)可知, 在系统发生对称性故障时, 线路中不会出现穿越电流, 因此流过线路各开关处的正序电流的大小只与向其提供电流的系统电源或者DG有关, 故可考虑利用正序电流来构造对称故障时的辅助判据。逆变型DG因为受制于控制策略, 所提供的短路电流一般不会超过其额定电流的2倍; 而直接接入馈线上的旋转型DG容量较小。故DG可提供的短路电流将远小于系统电源提供的短路电流。因此, 可构造基于正序电流幅值比的保护判据。

设流过同一线路区段内靠近电源侧开关的正序电流为 $I_u^+$ , 远离电源侧开关的正序电流为 $I_d^+$ 。构造两侧正序电流幅值比为

$$\alpha = |I_u^+ / I_d^+| \quad (11)$$

以图1中F<sub>1</sub>点发生对称故障为例分析线路各区段正序故障电流幅值比的特征。流过故障点上游区段B1-B2两端开关的正序电流均由系统电源提供的, 幅值近似相等, 即 $|I_u^+| \approx |I_d^+|$ , 故正序电流幅值比 $\alpha \approx 1$ ; 流过故障点下游区段B3-B4两端开关的正序电流均由DG提供, 幅值也近似相等, 即 $|I_u^+| \approx |I_d^+|$  (若DG退出运行则有 $|I_u^+| = |I_d^+| = 0$ ), 故正序电流幅值比 $\alpha \approx 1$ ; 流过故障区段B2-B3上游开关S12的正序电流 $I_u^+$ 由系统电源提供, 流过下游开关S21的正序电流 $I_d^+$ 由DG提供(若DG退出运行, 则有 $|I_d^+| = 0$ ), 系统电源提供的电流远大于DG提供

的电流, 即 $|I_u^+| \gg |I_d^+|$ , 故 $\alpha \gg 1$ 。

根据上述分析, 理论上正序电流幅值比满足:

$$\begin{cases} \alpha \approx 1 & \leftrightarrow \text{非故障区段} \\ \alpha \gg 1 & \leftrightarrow \text{故障区段} \end{cases} \quad (12)$$

由于实际系统中会产生误差, 从而导致正序电流幅值比 $\alpha$ 的计算值存在一定的偏差。因此构建正序电流幅值比较保护判据如下:

$$\begin{cases} 0.8 < \alpha < 1.2 & \rightarrow \text{非故障区段} \\ \alpha > 2 & \rightarrow \text{故障区段} \end{cases} \quad (13)$$

### 2.3 保护实现流程

上述电流序分量比较式保护方法由两部分组成, 针对非对称性故障, 采用负序电流相位比较式保护判据; 针对对称性故障, 采用正序电流幅值比判据。因此, 为实现上述保护, 还需正确判别故障类型。

由于正序电流存在于所有类型故障中, 负序电流只存在于不对称性故障中, 可据此来构造故障类型识别判据。设流过同一开关处的正、负序和零序电流分别为 $I^+$ 、 $I^-$ 和 $I^0$ 。则发生各种故障类型时, 理论上故障点处的正、负、零序电流之间存在如下关系。

当线路发生两相故障时, 有

$$\begin{cases} I^- = -I^+ \\ I^0 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

当线路发生两相接地故障时, 有

$$\begin{cases} I^- + I^0 = -I^+ \\ |I^-| > |I^0| \end{cases} \quad (15)$$

当线路发生三相对称故障时, 有

$$\begin{cases} I^+ \neq 0 \\ I^- = I^0 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

设置负序与正序电流幅值比为

$$\eta = |I^- / I^+| \quad (17)$$

根据以上分析的正、负、零序电流之间的关系得出如式(18)所示的故障类型判据为

$$\begin{cases} \eta = 1 & \rightarrow \text{两相故障} \\ \eta > 0.5 & \rightarrow \text{两相接地故障} \\ \eta = 0 & \rightarrow \text{三相对称故障} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)为理论上故障点处的故障类型判据, 实际系统中的测量点位于各线路区段两端开关处, 并且在测量、计算中会产生误差, 从而导致正、负序

电流比的计算存在一定偏差。因此将故障类型判据改进如下：

$$\begin{cases} \eta > 0.2 & \rightarrow \text{非对称故障} \\ \eta < 0.1 & \rightarrow \text{对称故障} \end{cases} \quad (19)$$

本文所提保护方法在含 DG 馈线中发生故障时，首先根据式(19)判断故障类型，再根据不同故障类型按式(8)或式(13)进行区内外故障判别。故障定位流程如图 6 所示。

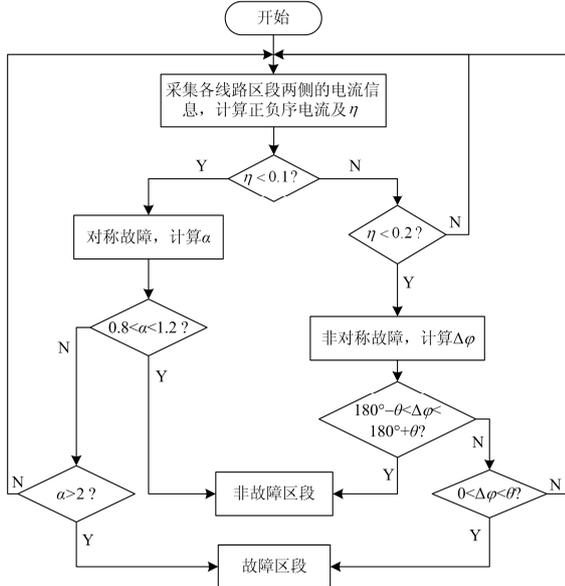


图 6 故障定位方法流程图  
Fig. 6 Flowchart of fault location scheme

### 3 仿真分析

在 PSCAD 中建立如图 1 所示的含 DG 馈线模型，对所提保护原理进行仿真分析。系统基准容量为 200 MVA，基准电压为 10.5 kV。取系统等值阻抗  $Z_S=j0.14 \Omega$ ，线路参数  $R_1=0.125 \Omega/\text{km}$ ， $X_1=0.72 \Omega/\text{km}$ 。逆变型电源额定功率为 4 MW，负荷为  $(10+j1.4) \text{ MVA}$ ，线路 B1-B2、B2-B3、B3-B4 长度分别为 3.8 km、3.1 km、1.0 km。仿真中取裕度角  $\theta$  为  $90^\circ$ 。表 1 为  $F_1$  点发生 AB 两相故障时的仿真结果；表 2 为  $F_2$  点发生 BC 两相接地故障(过渡电阻为  $5 \Omega$ )时的仿真结果；表 3 为  $F_3$  点发生 AB 两相故障时的仿真结果。

由表 1—表 3 可知，馈线中发生非对称性故障时： $\eta$  的值均大于 0.2，保护能够正确判断为非对称故障；同时，故障区段两侧的负序电流相位差  $\Delta\phi$  在  $(0, 90^\circ)$  范围内，非故障区段两侧相位差  $\Delta\phi$  在  $(90^\circ, 270^\circ)$  范围内，保护能够正确定位故障区段。

表 4—表 6 分别为  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  点发生三相对称性故障时的仿真结果。

表 1  $F_1$  点发生 AB 两相故障时的仿真结果

Table 1 Simulation results for AB two-phase fault at  $F_1$

开关	正序电流幅值/A	负序电流/A	$\eta$	$\Delta\phi(^{\circ})$	结果
CB1	1 000	786.5 $\angle$ 43.2	0.79	180.1	非故障
S11	1 000	786.5 $\angle$ -136.9	0.79		区段
S12	1 000	786.5 $\angle$ 43.2	0.79	45.8	故障
S21	103.3	188.9 $\angle$ 89	1.82		区段
S22	360.5	186.1 $\angle$ -90	0.51	180.3	非故障区段
S31	360.5	186.1 $\angle$ 90.3	0.51		

表 2  $F_2$  点发生 BC 两相接地故障时的仿真结果

Table 2 Simulation results for BC two-phase earth fault at  $F_2$

开关	正序电流幅值/A	负序电流/A	$\eta$	$\Delta\phi(^{\circ})$	结果
CB1	786.3	188 $\angle$ -72.4	0.24	180.4	非故障
S11	786.4	188 $\angle$ 108	0.24		区段
S12	803.3	208 $\angle$ -69	0.26	180	非故障
S21	803.3	208 $\angle$ 111	0.26		区段
S22	623.3	230 $\angle$ -63.2	0.37	42.2	故障
S31	330.2	80 $\angle$ -21	0.24		区段

表 3  $F_3$  点发生 AB 两相故障时的仿真结果

Table 3 Simulation results for AB two-phase fault at  $F_3$

开关	正序电流幅值/A	负序电流/A	$\eta$	$\Delta\phi(^{\circ})$	结果
CB1	4 287.5	2725 $\angle$ -92	0.64	6.6	故障
S11	742	830.7 $\angle$ -85.4	1.12		区段
S12	741.7	831 $\angle$ 94.6	1.12	180	非故障
S21	741.7	831 $\angle$ -85.4	1.12		区段
S22	1 095.8	831 $\angle$ 94.6	0.76	180.1	非故障
S31	1 095.8	831 $\angle$ -85.5	0.76		区段

由表 4—表 6 可知，线路发生对称性故障时： $\eta$  的值均为 0，保护能够正确判断为对称性故障；故障区段两侧的正序电流幅值比  $\alpha$  均大于 2，非故障区段两侧的正序电流幅值比  $\alpha$  均在  $(0.8, 1.2)$  范围内，保护可正确定位故障区段。

由以上仿真分析可知，无论含 DG 馈线中发生何种类型的故障，本文所提保护方法均能正确判断故障类型并定位故障区段。

表 4  $F_1$  点发生对称故障时的仿真结果

Table 4 Simulation results for symmetric fault at  $F_1$

开关	正序电流幅值/A	负序电流/A	$\eta$	$\alpha$	结果
CB1	2 615	0	0	1	非故障
S11	2 616	0	0		区段
S12	2 557	0	0	8.6	故障
S21	297	0	0		区段
S22	18	0	0	1	非故障
S31	18	0	0		区段

表 5  $F_2$  点发生对称故障时的仿真结果Table 5 Simulation results for symmetric fault at  $F_2$ 

开关	正序电流幅值/A	负序电流/A	$\eta$	$\alpha$	结果
CB1	1 557	0	0	1	非故障
S11	1 557	0	0		区段
S12	1 869	0	0	1	非故障
S21	1 869	0	0		区段
S22	1 842	0	0	$\infty$	故障
S31	0	0	0		区段

表 6  $F_3$  点发生对称故障时的仿真结果Table 6 Simulation results for symmetric fault at  $F_3$ 

开关	正序电流幅值/A	负序电流/A	$\eta$	$\alpha$	结果
CB1	6 557	0	0	1	非故障
S11	361	0	0		区段
S12	38	0	0	8.6	故障
S21	38	0	0		区段
S22	25	0	0	1	非故障
S31	25	0	0		区段

## 4 动模实验

### 4.1 动模测试模型

动模实验室配电网模型如图 7 所示, 以此平台模拟含 DG 馈线的运行情况, 对本文所提的电流序分量比较式保护的有效性进行测试。动模测试平台以 1 kV 系统模拟 10 kV 系统, 以额定电压为 380 V 的小容量发电机升压后模拟 10 kV 分布式电源。SFTU01、SFTU02 为应用本文所提保护原理开发的智能馈线终端, 两台 SFTU 分别安装在系统母线出口开关处与分布式电源与母线连接处。SBK 为线路断路器, XK 为线路开关, 线路 AB 长度为 19.845 km。

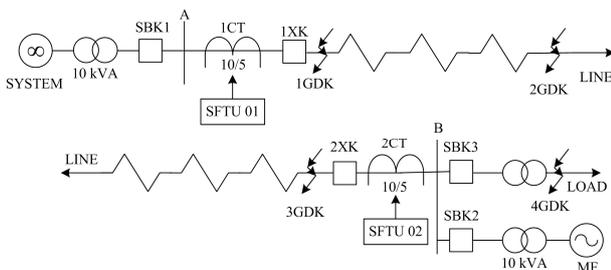


图 7 动模测试模型

Fig. 7 Dynamic simulation test model

### 4.2 测试数据

分别在系统母线出口 1GDK、线路中点 2GDK、DG 侧 3GDK 与线路外部 4GDK 处设置不同类型故障, 测试 SFTU01 与 SFTU02 的保护性能, 动模测试中各故障点发生不同类型故障时的保护动作情况(故障开始时间为 0 ms)如表 7—表 9 所示。

表 7 1GDK 处故障时保护动作情况

Table 7 Protection operating results for fault at 1GDK

故障类型	故障相别	保护动作情况	分闸时间/ms	
			SFTU01	SFTU02
两相短路	AB	动作	59	45
	AC	动作	54	48
	BC	动作	57	52
	BCN	动作	48	47
	ABN	动作	57	54
	ACN	动作	49	49
三相短路	ABC	动作	50	48

表 8 2GDK 处故障时保护动作情况

Table 8 Protection operating results for fault at 2GDK

故障类型	故障相别	保护动作情况	分闸时间/ms	
			SFTU01	SFTU02
两相短路	AB	动作	51	53
	AC	动作	55	48
	BC	动作	61	52
	BCN	动作	51	56
	ABN	动作	51	48
	ACN	动作	51	49
三相短路	ABC	动作	55	54

表 9 3GDK 处故障时保护动作情况

Table 9 Protection operating results for fault at 3GDK

故障类型	故障相别	保护动作情况	分闸时间/ms	
			SFTU01	SFTU02
两相短路	AB	动作	60	54
	BC	动作	50	49
	ACN	动作	51	49
三相短路	ABC	动作	53	49

由表 7—表 9 及故障录波图可知: 当馈线区段内部发生不同类型的故障时, 线路两端 SFTU 均能启动, 且判定为区内故障并发出保护跳闸信号; 动作时间集中在 50 ms 左右, 且波动较小, 故障隔离时间远低于集中遥控型的故障处理模式, 满足对保护动作时间的要求; 无论故障发生在被保护线路区段内的始端、末端还是中间, 两端 SFTU 动作切除故障的时间基本一致。

当馈线区段外部发生各种类型故障时, 位于非故障区段的终端装置 SFTU01、SFTU02 均能判定故障发生在区外且可靠不动作。

由动模测试的结果可以看出, 基于本文所提保护原理开发的智能馈线终端, 在各种故障类型下均能准确判断故障区段, 且动作时间均在 70 ms 以内, 满足速动性的要求。

## 5 结论

DG 直接接入馈线改变了配电网的故障特性, 导致现有的基于全电流与正序电流保护原理的灵敏度降低或失效。为解决此问题, 本文通过分析含 DG 馈线中发生不同类型故障时的正、负序电流特征, 提出了一种适用于含 DG 馈线的电流序分量比较式保护方法。该方法利用负序电流相位差动原理定位非对称性故障区段; 利用正序电流幅值比判据定位对称性故障区段。所提方法不受故障穿越电流、负荷和 DG 控制策略的影响, 实用性强。此外, 保护原理仅需电流信息, 不需要电压量, 经济性强。PSCAD 仿真与动模测试结果均验证了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.  
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [2] KROPOSKI B, PINK C, DEBLASIO R. Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 901-908.
- [3] 李娟, 高厚磊, 弓新月, 等. 一种用于配电网故障数据自同步的故障时刻检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 92-98.  
LI Juan, GAO Houlei, GONG Xinyue, et al. A novel fault instant detection scheme for fault data self-synchronization method in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 92-98.
- [4] ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, YANG Jingjing, et al. Principle of pilot protection based on positive sequence fault component in distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[C] // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, March 19-23, 2019, Bangkok, Thailand: 1-6.
- [5] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的智能配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 9-14.  
TANG Zhijun, ZOU Guibin, GAO Houlei, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 9-14.
- [6] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [7] 李娟, 高厚磊, 朱国防. 考虑逆变类分布式电源特性的有源配电网反时限电流差动保护[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 74-83.  
LI Juan, GAO Houlei, ZHU Guofang. Inverse-time current differential protection in active distribution network considering characteristics of inverter-interfaced distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 74-83.
- [8] 徐萌, 邹贵彬, 高磊, 等. 含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 93-99.  
XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 93-99.
- [9] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 81-84.  
SUN Jingdiao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 81-84.
- [10] GAO H, LI J, XU B. Principle and implementation of current differential protection in distribution networks with high penetration of DGs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 565-574.
- [11] ZHANG F, MU L, GUO W. An Integrated wide-area protection scheme for active distribution networks based on fault components principle[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 392-402.
- [12] PIGNATI M, ZANNI L, ROMANO P, et al. Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 381-392.
- [13] YANG Jingjing, ZHOU Chenghan, ZOU Guibin. A protection scheme based on positive sequence fault

- component for active distribution networks[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China: 1-5.
- [14] 徐萌, 邹贵彬, 陈宁, 等. 基于故障超前相的有源配电网能量方向纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 58-63.  
XU Meng, ZOU Guibin, CHEN Ning, et al. Energy-directional pilot protection based on leading-phase for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 58-63.
- [15] 张艳霞, 代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 71-74.  
ZHANG Yanxia, DAI Fengxian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [16] 康文文. 面向智能配电网的快速故障检测与隔离技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.  
KANG Wenwen. Study of fast fault detection and isolation technology for smart distribution grid[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [17] 杨秋霞, 姜培培, 刘同心, 等. 含光伏电源配电网的复合序网自适应保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 24-30.  
YANG Qiuxia, JIANG Peipei, LIU Tongxin, et al. Photovoltaic power distribution network in composite sequence network adaptive protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 24-30.
- [18] 高孟友, 徐丙垠, 张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 21-25.  
GAO Mengyou, XU Bingyin, ZHANG Xinhui. Fault location based on fault current amplitude comparison for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 21-25.
- [19] ELHALABI N, GARCÍA-GRACIA M, BORROY J, et al. Current phase comparison pilot scheme for distributed generation networks protection[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4563-4569.
- [20] 彭春华, 张艳伟. 基于电流正序分量相位比较的主动配电网保护方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 163-169.  
PENG Chunhua, ZHANG Yanwei. Protection scheme based on phase comparison of positive-sequence fault current for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 163-169.
- [21] JALILIAN A, HAGH M T, HASHEMI S M. An innovative directional relaying scheme based on postfault current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2640-2647.
- [22] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变量方向的有源配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 97-103.  
SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 97-103.
- [23] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

收稿日期: 2018-08-20

作者简介:

杨晶晶(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与馈线自动化; E-mail: 50147734@qq.com

林凡勤(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与安全运行;

周成瀚(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为有源配电网保护与控制。E-mail: zhouchenghan@139.com

(编辑 姜新丽)