

DOI: 10.7667/PSPC161587

分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计

高亮, 郎陈杰, 夏能弘

(上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 分析了 DG 并网对配电网故障电流的影响, 并提出一种改进保护方案。方案利用含 DG 配电网的故障电流特征, 采用两侧电流的相角变化量作为判据进行故障定位, 由始端保护装置实现主电源到 DG 接入点之间故障的判别。方案对电流幅值的精确度要求不高, 能有效避免系统运行方式变化产生的影响, 简单可靠; 仅需要传输反映电流相角变化方向的数字信号和保护决策信号, 对通信通道要求不高; 仅需要采集故障前后的电流信息量, 节省了电压互感器, 对配电网而言具有良好的经济性。仿真实验证明其可行性。

关键词: DG 并网; 配电网; 故障特征; 保护方案; 仿真实验

Design of relay protection scheme of distribution network with DG

GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: This paper analyses the effects of DG supply to distribution network's fault current, and proposes an improved protection scheme. The scheme utilizes the fault current characteristics of the DG distribution network, refers to the phase angle change of the current at both sides of the line, control from the beginning, to determine the fault between the main power supply and the DG access point. The request of current amplitude's accuracy is not high, and it is not influenced by the system operation mode, simple and reliable; only the digital signal reflects the change direction of current phase angle and protection decision signal need to transmit, communication channel requirement is not high; only the current information collected before and after the fault is required, saving the voltage transformer and having a good economy for the distribution network. The simulation experiment proves its feasibility.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607110) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 14ZR1417600).

Key words: DG supply; distribution network; fault characteristics; protection scheme; simulation experiment

0 引言

目前, 传统一次能源日益短缺, 环境污染严重, 基于可再生能源的分布式发电技术得到广泛研究和持续发展。分布式电源(Distributed Generation, DG)具有节能环保、输电投资低和适应可再生能源等特点, 发展使用分布式电源一方面能降低现有能源体系对于传统化石能源的依赖, 减少碳排; 另一方面也能使电网供电方式多元化, 提高用户用电可靠性。然而其负面影响也不容忽视, 分布式电源并网后, 传统配电网故障电流发生改变, 配电网原有保护配置的工作环境发生变化, 在相当程度上影响到三段

式电流保护动作判别, 可能使之无法正常工作^[1]。

分布式电源的并网, 改变了传统配电网的辐射型单电源网络结构, 变为多端多电源网络结构。根据这一特征, 一些学者提出在原有保护基础上加装方向元件^[2-3]。由于需要同时测量电流和电压, 装置变得复杂化, 对广大的配电网而言不具备经济性。文献[4-7]在分析了分布式电源并网对原有保护系统影响的基础上, 分别提出了一种自适应保护的方案。从仿真结果来看, 这些方案可行且准确可靠, 但应用该方案需对配电网做较大改造, 相关技术手段也还不够完善。文献[8-15]为消除 DG 并网影响, 提出基于通信技术的保护方案。通过利用多点信息, 集中处理, 快速判断故障区域。然而此类保护对于通信可靠性要求较高, 一旦通信发生错误, 保护可能失效。文献[16]提出一种基于电流相角变量的纵联

基金项目: 国家自然科学基金(51607110); 上海市自然科学基金(14ZR1417600)

保护方案, 无需测量电压量, 具有良好的经济性。然而仅适用于中间无支线的线路, 当线路中有分支线时, 以电流相角变量作为唯一判据的保护可靠性较低。

本文在分析含分布式电源配电网的故障电流特征的基础上, 提出改进的继电保护方案。本方案对于通信通道要求不高, 无需加装方向元件, 较为简单可靠, 对广大配电网而言经济性较好。

1 含 DG 配电网特性分析

根据线路始端故障电流会随着故障点位置不同而发生改变的原理, 本文提出一种利用本地信息量的保护方案, 仅在馈线始端装设一套电流保护, 线路中发生故障均由始端保护判断故障区域, 并将决策信息发送给下游各段保护装置, 即馈线的所有保护装置均由始端保护控制。以图 1 所示配电网模型为例进行分析, 配电网发生故障时, 等效电路如图 2 所示。

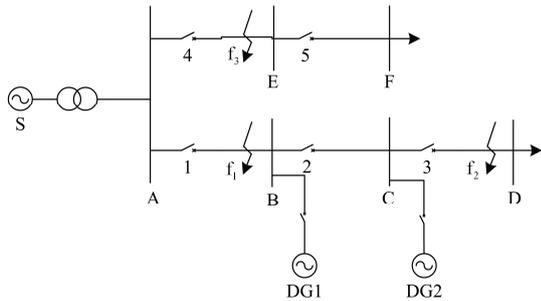


图 1 含 DG 的配电网模型

Fig. 1 A distribution network model with DG

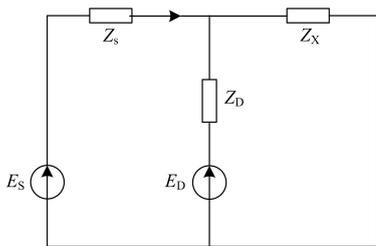


图 2 故障等效电路图

Fig. 2 Fault equivalent circuit

图中, Z_s 为系统至 DG 并网处的系统等效阻抗, Z_x 为 DG 并网处至故障发生处的系统等效阻抗, Z_D 为 DG 阻抗。 I'_s 为无 DG 并网情况下配电网短路故障线路始端电流, I_s 为 DG 并网条件下配电网故障线路始端电流。

$$I'_s = \frac{E_s}{Z_s + Z_x} \quad (1)$$

$$I_s = \frac{E_s}{Z_s + Z_x + \frac{Z_s Z_x}{Z_D}} \quad (2)$$

$$K = \frac{I'_s}{I_s} = 1 + \frac{Z_s Z_x}{(Z_s + Z_x) Z_D} = 1 + \frac{Z_s}{(\frac{Z_s}{Z_x} + 1) Z_D} \quad (3)$$

2 保护原理

由式(3)可知, Z_x 越大, 即故障发生点距离线路始端越远, 比值 K 越大, I_s 与无 DG 并网情况下线路始端故障电流 I'_s 偏离越明显。利用这一特性, 可以通过测量线路始端故障电流幅值来判断故障区域。整定方法如式(4)。

$$\begin{cases} I_{setA} = K_K I_{AB} \\ I_{setB} = K_K I_{BC} \\ I_{setC} = K_K I_{CD} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{AB} 为 DG 并网系统最大运行方式条件下 AB 段线路末端三相短路电流; I_{BC} 为 DG 并网系统最大运行方式条件下 BC 段线路末端三相短路电流; I_{CD} 为 DG 并网系统最大运行方式条件下 CD 段线路末端三相短路电流; K_K 为可靠系数。

系统发生故障时, 保护装置将测量到的线路始端电流幅值与各整定值按从大到小次序依次比较, 判断故障区域。例如故障发生在 BC 段, I_s 首先与 I_{setA} 进行比较, 得出 $I_s < I_{setA}$, 继而与 I_{setB} 比较得出 $I_s > I_{setB}$, 由此判断故障点在 BC 段线路上。此种保护方案利用了 DG 并网后线路短路电流的特点, 避免了 DG 并网对配电网保护的负面影响。然而本方案也不能免于电流保护的通病, 即难以准确区分本线路末端与下级线路首端故障, 需引入其他判据辅助。

本文利用电流相角故障前后的变化特点, 引入保护判据, 区分线路末端故障和下级线路首端故障^[17]。以图 3 为例, 选取配电网中一段线路进行分析, 由于 DG 的加入, 配电网由单端供电模式变为多端供电模式, 系统 1 和系统 2 分别为线路上游侧和下游侧配电网, 初始负荷功率由 A 端流向 B 端。下面主要研究故障前后电流相角变化特征。

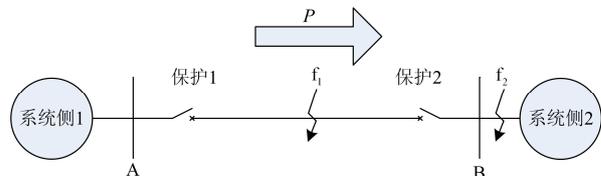


图 3 接有 DG 的配电网线路

Fig. 3 Distribution network with DG

2.1 区内 f_1 点故障

保护应能反映各种不同类型的故障, 考虑在各种类型短路故障中均含有正序分量, 以下采用正序分量分析。见图 3, 系统正常运行电流为

$$\dot{I}_{1\text{pre}} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} \quad (5)$$

式中: \dot{U}_{1A} 、 \dot{U}_{1B} 分别为 A、B 节点的电压; Z_{1AB} 为节点 A、B 之间线路阻抗。当故障发生在区内 f_1 点处, 根据叠加定理, 网络可分解为正常运行状态和故障附加状态两个运行状态的叠加, 如图 4、图 5 所示。

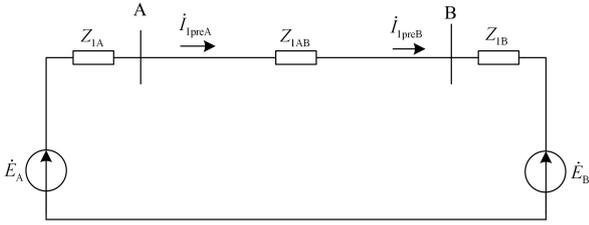


图 4 配电网正常运行网络

Fig. 4 Normal operation circuit of distribution network

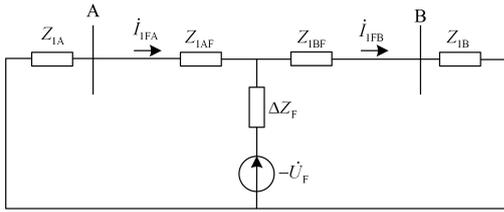


图 5 配电网区内故障附加网络

Fig. 5 Internal fault superimposed circuit of distribution network

设 \dot{I}_{1A} 、 \dot{I}_{1B} 分别为 A、B 节点的正序故障电流, 其电流参考方向与正常运行电流 $\dot{I}_{1\text{pre}}$ 一致, $Z'_{1A} = Z_{1A} + Z_{1AF}$, $Z'_{1B} = Z_{1B} + Z_{1BF}$ 。 ΔZ_F 为故障附加阻抗, 其大小由短路类型而定。根据等效网络, 故障电流可等效为正常运行电流分量与故障附加电流分量之和, 其中:

$$\dot{I}_{1\text{preA}} = \dot{I}_{1\text{preB}} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} \quad (6)$$

$$\dot{I}_{1fA} = -\frac{-U_F}{\Delta Z_F + Z'_{1A} // Z'_{1B}} \cdot \frac{Z'_{1B}}{Z'_{1A} + Z'_{1B}} = \frac{U_F}{Z_{1\Sigma A}} \quad (7)$$

$$\dot{I}_{1fB} = \frac{-U_F}{\Delta Z_F + Z'_{1A} // Z'_{1B}} \cdot \frac{Z'_{1A}}{Z'_{1A} + Z'_{1B}} = \frac{-U_F}{Z_{1\Sigma B}} \quad (8)$$

$$Z_{1\Sigma A} = \frac{(\Delta Z_F + Z'_{1A} // Z'_{1B})(Z'_{1A} + Z'_{1B})}{Z'_{1B}} \quad (9)$$

$$Z_{1\Sigma B} = \frac{(\Delta Z_F + Z'_{1A} // Z'_{1B})(Z'_{1A} + Z'_{1B})}{Z'_{1A}} \quad (10)$$

$$\dot{I}_{1A} = \dot{I}_{1\text{preA}} + \dot{I}_{1fA} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} + \frac{\dot{U}_F}{Z_{1\Sigma A}} \quad (11)$$

$$\dot{I}_{1B} = \dot{I}_{1\text{preB}} + \dot{I}_{1fB} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} + \frac{-\dot{U}_F}{Z_{1\Sigma B}} \quad (12)$$

式中: $\dot{I}_{1\text{preA}}$ 、 $\dot{I}_{1\text{preB}}$ 分别为 A、B 节点正常运行电流分量, 参考方向如图 4 所示; \dot{I}_{1fA} 、 \dot{I}_{1fB} 分别为 A、B 节点故障附加正序电流分量, 参考方向如图 5 所示。 $\varphi_{\Sigma A}$ 、 $\varphi_{\Sigma B}$ 分别为 $Z_{1\Sigma A}$ 、 $Z_{1\Sigma B}$ 的阻抗角, 可画出线路内部故障时各电气量向量关系如图 6。

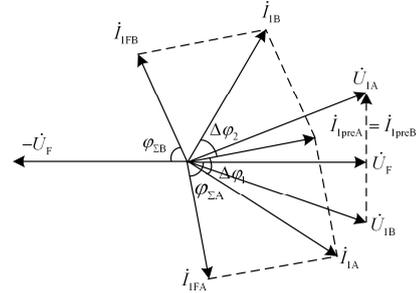


图 6 区内故障电流向量图

Fig. 6 Current phasor diagram for an internal fault

图中, $\Delta \varphi_1$ 、 $\Delta \varphi_2$ 分别为 \dot{I}_{1A} 与 $\dot{I}_{1\text{preA}}$ 、 \dot{I}_{1B} 与 $\dot{I}_{1\text{preB}}$ 的夹角, 即为故障前后正序电流相角的变化量。由图 6 可知: $\Delta \varphi_1 = \arg(\dot{I}_{1A} / \dot{I}_{1\text{preA}}) < 0$, 节点 A 处故障前后的正序电流相角变化方向为负; $\Delta \varphi_2 = \arg(\dot{I}_{1B} / \dot{I}_{1\text{preB}}) > 0$, 节点 B 处电流相角变化方向为正。若初始负荷功率方向为 B 流向 A, 同理可分析得出: $\Delta \varphi_1 = \arg(\dot{I}_{1A} / \dot{I}_{1\text{preA}}) > 0$, 节点 A 处故障前后的正序电流相角变化方向为正; $\Delta \varphi_2 = \arg(\dot{I}_{1B} / \dot{I}_{1\text{preB}}) < 0$, 节点 B 处电流相角变化方向为负。由此得出结论: 若故障发生在线路内部, 线路两端的正序电流相角变化方向相反。

2.2 区外 f_2 点故障

当故障发生在区外 f_2 点处, 等效网络正常运行状态如图 4 所示, 故障附加状态如图 7 所示。

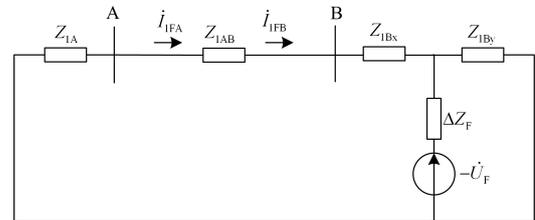


图 7 配电网区外故障附加网络

Fig. 7 External fault superimposed circuit of distribution network

故障电流计算公式为

$$\dot{I}_{I_{preA}} = \dot{I}_{I_{preB}} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} \quad (13)$$

$$\dot{I}_{I_{FA}} = \dot{I}_{I_{FB}} = \frac{\dot{U}_F}{Z_{1A} + Z_{1AB} + Z_{1Bx} + \Delta Z_F} \quad (14)$$

$$\dot{I}_{1A} = \dot{I}_{I_{preA}} + \dot{I}_{I_{FA}} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} + \frac{\dot{U}_F}{Z_{1A} + Z_{1AB} + Z_{1Bx} + \Delta Z_F} \quad (15)$$

$$\dot{I}_{1B} = \dot{I}_{I_{preB}} + \dot{I}_{I_{FB}} = \frac{\dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B}}{Z_{1AB}} + \frac{\dot{U}_F}{Z_{1A} + Z_{1AB} + Z_{1Bx} + \Delta Z_F} \quad (16)$$

电流参考方向同前， φ_Σ 为 $Z_\Sigma = Z_{1A} + Z_{1AB} + Z_{1Bx} + \Delta Z_F$ 的阻抗角，各电气量向量关系如图 8。

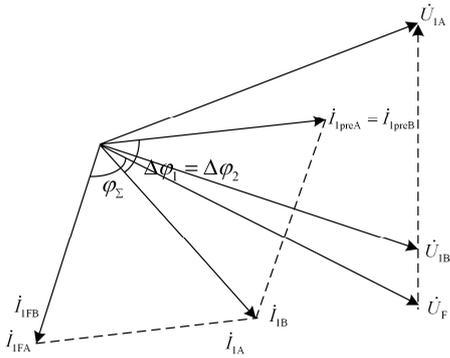


图 8 区外故障电流向量图

Fig. 8 Current phasor diagram for an external fault

从图 8 中可以看出： $\Delta\varphi_1 = \arg(\dot{I}_{1A} / \dot{I}_{I_{preA}}) < 0$ ，节点 A 处故障前后的正序电流相角变化方向为负； $\Delta\varphi_2 = \arg(\dot{I}_{1B} / \dot{I}_{I_{preB}}) < 0$ ，节点 B 处电流相角变化方向为负。若初始负荷功率由 B 流向 A，同理得出： $\Delta\varphi_1 = \arg(\dot{I}_{1A} / \dot{I}_{I_{preA}}) > 0$ ，节点 A 处的正序电流相角变化方向为正； $\Delta\varphi_2 = \arg(\dot{I}_{1B} / \dot{I}_{I_{preB}}) > 0$ ，节点 B 处电流相角变化方向为正。由此可得出结论：若故障发生在线路外部，线路两端电流相角变化方向相同。

根据前文分析结果，可总结出以下规律：

- ⌈ 区内故障时线路两侧正序电流相角变化方向相反
- ⌋ 区外故障时线路两侧正序电流相角变化方向相同

2.3 过渡电阻影响分析

以上内容分析建立在假设金属性短路的前提下。现实中的故障一般是非金属性短路，需要考虑过渡电阻的影响。为分析简便，直接在图 5 中加入过渡电阻 R_G ，得到图 9 进行分析。

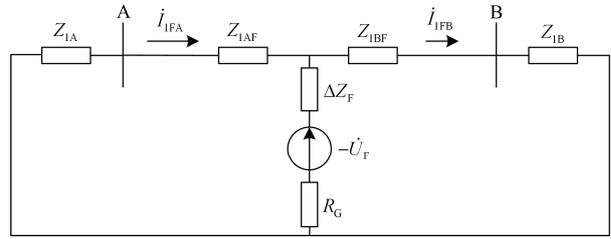


图 9 加入过渡电阻的故障附加网络

Fig. 9 Internal fault superimposed circuit with the transition resistor

A、B 两处的故障附加电流为

$$\dot{I}_{I_{FA}} = - \left(\frac{-\dot{U}_F}{\Delta Z_F + R_G + Z'_{1A} // Z'_{1B}} \cdot \frac{Z'_{1B}}{Z'_{1A} + Z'_{1B}} \right) = \frac{-\dot{U}_F}{Z'_{1A} + (\Delta Z_F + R_G) \left(\frac{Z'_{1A}}{Z'_{1B}} + 1 \right)} \quad (17)$$

$$\dot{I}_{I_{FB}} = \frac{-\dot{U}_F}{\Delta Z_F + R_G + Z'_{1A} // Z'_{1B}} \cdot \frac{Z'_{1A}}{Z'_{1A} + Z'_{1B}} = \frac{-\dot{U}_F}{Z'_{1B} + (\Delta Z_F + R_G) \left(\frac{Z'_{1B}}{Z'_{1A}} + 1 \right)} \quad (18)$$

对比式(7)与式(17)、式(8)与式(18)发现，过渡电阻使公式中分母的实部增大，等效阻抗角减小。设 $\dot{I}_{I_{FA}}$ 、 $\dot{I}_{I_{FB}}$ 计算公式中分母等效阻抗的阻抗角分别为 $\varphi'_{\Sigma A}$ 、 $\varphi'_{\Sigma B}$ ，向量分析如图 10 所示。

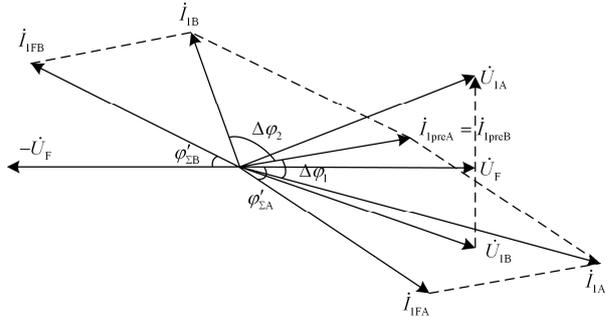


图 10 加入过渡电阻的故障电流向量图

Fig. 10 Fault current phasor diagram with the transition resistor

过渡电阻的加入使 \dot{I}_{1A} 与 $\dot{I}_{I_{preA}}$ 的夹角 $\Delta\varphi_1$ 绝对值变小， \dot{I}_{1B} 与 $\dot{I}_{I_{preB}}$ 的夹角 $\Delta\varphi_2$ 绝对值变大。但 $\Delta\varphi_1 < 0$ 、 $\Delta\varphi_2 > 0$ 保持不变。由此可见，虽然过渡电阻会影响到 $\Delta\varphi$ 的数值大小，但不会改变其正负性，进而不会影响保护对两侧电流相角变化方向的判定。所以保护方案对过渡电阻的影响有相当强的抗性。

3 保护方案

保护算法如图 11 所示。故障定位分为两步：第一步根据馈线始端电流幅值进行模糊定位，将判定的区段及其上下游的区段划为大故障区域；第二步以大故障区域内各节点的正序电流相角变化方向信息为判据，实现故障的准确定位。当系统运行方式改变时，线路始端处测量到的短路电流也会随之变化，但影响程度不会使故障区段在算法第一步中被误排在大故障区域外；其后第二步中就能准确判定出故障区段。所以本文保护方案能有效避免系统运行方式变化带来的不利影响。

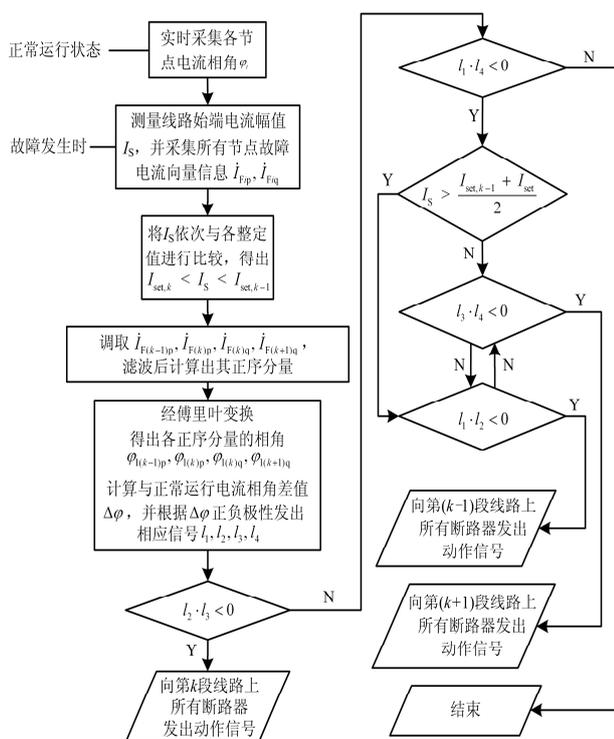


图 11 保护方案算法流程图

Fig. 11 Flow chart of algorithm of protection scheme

图 11 中， $i=1,2,3,\dots,n$ ， $k \in \{i\}$ ， n 为馈线总段数， p 、 q 角标分别表示线路首端与线路末端， $I_{set,0} = +\infty$ ， $\Delta\varphi$ 取值 $-\pi$ 到 π 之间。 l 为数字传输信号，其值有 1、-1 两种：当 $\Delta\varphi < 0$ 时， $l = -1$ ；当 $\Delta\varphi > 0$ 时， $l = 1$ 。

4 算例仿真

使用 PSCAD 软件搭建仿真模型验证保护方案的可行性。含分布式电源的配电网模型如图 12 所示。配电网系统基准容量为 500 MVA，额定电压为 10.5 kV。

系统最大运行方式下阻抗 $X_{s \min} = 0.91 \Omega$ ，最小运行方式下 $X_{s \max} = 1.26 \Omega$ 。馈线 1： $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CD} = 18.13 + j6.51 \Omega$ ， $Z_{DE} = 36.26 + j13.02 \Omega$ ；馈线 2： $Z_{AF} = 10.8 + j13.88 \Omega$ ， $Z_{FG} = 15.54 + j5.58 \Omega$ 。每条馈线接入容量为 6 MVA 的负荷，功率因数为 0.85。短路点处加 10Ω 过渡电阻。

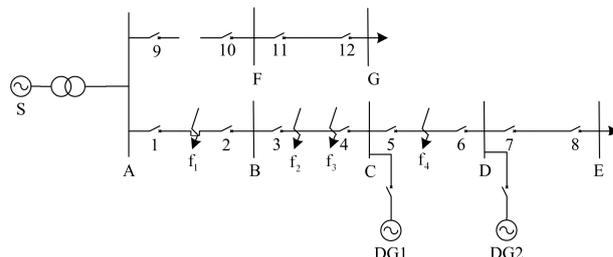


图 12 含 DG 的配电网模型

Fig. 12 Distribution network model with DG

如图 12，取有代表性的短路点 f_1 — f_4 进行研究。其中， f_1 点在 AB 段线路 50% 处， f_2 点在 BC 段起始处， f_3 点在 BC 段末端， f_4 点在 CD 段 50% 处。这 4 点基本包含了接入 DG 的配电网发生短路故障的各种可能情况，具有代表性。

先测得系统最大运行方式下各段线路末端发生三相短路时馈线始端故障电流如表 1，根据整定公式(4)， k 取 1.2，得出整定值。

表 1 配电网故障电流整定值

Table 1 Setting value of fault current in distribution network

| | 最大短路电流值/A | 整定值/A | | 整定值/A |
|----------|-----------|------------|--------|-------|
| I_{AB} | 313.48 | I_{setA} | 376.18 | |
| I_{BC} | 156.96 | I_{setB} | 188.35 | |
| I_{CD} | 63.11 | I_{setC} | 75.73 | |
| I_{DE} | 13.09 | I_{setD} | 15.71 | |

正常运行状态下各段线路首端与末端正序电流相角如表 2。

表 2 初始电流相角

Table 2 Initial current phase

| 线路首端正序电流相角 | | 线路末端正序电流相角 | |
|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| φ_{Ap} | -27.51° | φ_{Aq} | -27.51° |
| φ_{Bp} | -27.51° | φ_{Bq} | -27.51° |
| φ_{Cp} | -83.50° | φ_{Cq} | -83.50° |
| φ_{Dp} | -118.76° | φ_{Dq} | -118.76° |

各故障点发生不同类型短路故障的仿真结果如表 3 所示。

仿真结果表明，在不同点和不同故障类型情况下，本保护方案均能有效判别故障区域。

表 3 各点故障仿真结果

Table 3 Simulation results for each point of fault

| 短路点 | 短路类型 | 短路电流/A | I_s 判定范围 | $\Delta\varphi_p$ | $\Delta\varphi_{iq}$ | 动作保护 |
|-------|-----------|--------|------------|-------------------|----------------------|------|
| f_1 | ABC →G | 278.03 | BC | 92° | 92° | 1 2 |
| | | | AB | -69.17° | 92° | |
| | A→G | 278.03 | BC | 80.93° | 80.93° | 1 2 |
| | | | AB | -66.4° | 80.93° | |
| | AB | 338.33 | BC | 80.93° | 80.93° | 1 2 |
| | | | AB | -72.5° | 80.93° | |
| f_2 | ABC →G | 172.15 | CD | 126.54° | 126.54° | 3 4 |
| | | | BC | -68.77° | 88.71° | |
| | A→G | 172.15 | CD | -57.2° | -57.2° | 3 4 |
| | | | BC | -64.35° | 82.16° | |
| | AB | 196.83 | BC | -71.99° | 82.46° | 3 4 |
| | | | BC | -71.99° | 82.46° | |
| f_3 | ABC →G | 87.42 | CD | 105.09° | 105.09° | 3 4 |
| | | | BC | -44.82° | 75.1° | |
| | A→G | 87.42 | CD | 82.9° | 82.9° | 3 4 |
| | | | BC | -38.78° | 72.77° | |
| | AB | 104.29 | CD | 84.81° | 84.81° | 3 4 |
| | | | BC | -54.83° | 62.2° | |
| f_4 | ABC →G | 53.91 | DE | -55.12° | -55.12° | 5 6 |
| | | | CD | -28.24° | 136.33° | |
| | A→G | 53.91 | DE | -41.17° | -41.17° | 5 6 |
| | | | CD | -22.2° | 117.69° | |
| | AB | 62.51 | DE | -46.78° | -46.78° | 5 6 |
| | | | CD | -4.18° | 121.75° | |

5 结语

本文针对 DG 并网后对传统配电网保护的影响,在研究了接有 DG 的配电网故障特性的基础上,提出改进的保护方案。方案有效避免了 DG 并网对配电网保护的不利影响,在各种情况下均能可靠动作;利用故障区域两侧正序电流相角变化方向为判据实现准确故障定位,不受系统运行方式变化影响;仅需传输反映电流相角变化方向的数字信号和保护决策信号,对通信通道要求不高;投入低,无需电压互感器。其局限性在于只能应用于两侧均有电源(系统或 DG)供电的线路。当被保护线路为单端供电模式时,该保护方案无法适用。所以对 DG 下游线路还需加设其他保护判据。

参考文献

[1] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System

Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
[2] 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.
[3] 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 Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. A protection scheme for distribution system with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 81-84.
[4] 黄纯, 刘鹏辉, 江亚群, 等. 基于动态时间弯曲距离的主动配电网馈线差动保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 240-247.
HUANG Chun, LIU Penghui, JIANG Yaqun, et al. Feeder differential protection based on dynamic time warping distance in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 240-247.
[5] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
SUN Jingliao, 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(14): 71-76.
[6] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.
HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
[7] 许轩, 陆于平. 含 DG 配网电流幅值差异化保护方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 164-140.
XU Xuan, LU Yuping. Current amplitude differential protection for distribution system with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 164-140.
[8] 杨贵, 孙磊, 李力, 等. 区域保护与控制系统网络拓扑方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 49-55.
YANG Gui, SUN Lei, LI Li, et al. Research on regional protection and control system network topology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 49-55.

- [9] 吴立杰, 陈星莺, 徐石明, 等. 考虑电流保护可靠性的分布式电源准入容量研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 35-39.
WU Lijie, CHEN Xingying, XU Shiming, et al. Calculating the maximum penetration capacity of distributed generation considering current protection[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 35-39.
- [10] 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.
- [11] 李乃永, 梁军, 赵义术, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.
LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu, et al. Protection schemes for distribution network considering the randomness of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 33-38.
- [12] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5.
- [13] 盛文玥. 多电源多支线配电网面保护方法[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 64-68.
SHENG Wenyue. The plane protection method for multi-power multi-branch distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 64-68.
- [14] USTUN T S, OZANSOY CZAYEUH A. Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(8): 1560-1567.
- [15] HARON A R, MOHAMED A, SHAREEF H. Analysis and solutions of overcurrent protection issues in a microgrid[C] // 2012 IEEE International Conference on Power and Energy, 2012: 644-649.
- [16] 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 distributions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 97-103.
- [17] 张嵩. 基于正序电流故障分量相角突变量的方向元件的实现[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(上册), 中国农业大学: 2008: 5.

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2017-02-19

作者简介:

高亮(1960—), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及数字化变电站; E-mail: gaoliang@shiep.edu.cn

郎陈杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护、故障诊断。E-mail: 993543443@qq.com

(编辑 魏小丽)