

分布式发电条件下的新型电流保护方案

林 霞, 陆于平, 王联合

(东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096)

摘要: 根据分布式发电(DG)接入配电网后网络结构和故障电流的变化特点, 提出了一种新型电流保护方案。该方案利用电流综合幅值的比较将故障范围缩小到一个故障搜索区域之间, 然后利用该区域电流间的相位关系对故障线段进行定位。文中详细论证了故障搜索的电流幅值判据和故障判断的电流相位判据, 并分别提出了其矩阵算法, 该算法对 DG 投退造成的网络结构的随机变化具有自适应性, 对智能电子设备(IED)故障具备一定的容错能力, 满足 DG 接入对配电网保护提出的要求。利用 IED 进行分布式处理, 降低了保护对通信系统的要求, 同时, 由于仅利用电流量进行故障搜索判定, 工程上较容易实现。文中对该电流保护方案进行了算例仿真, 证明了方案的正确性。

关键词: 分布式发电; 故障搜索方向; 故障搜索区域; 故障定位

中图分类号: TM773

0 引言

分布式发电(DG)条件下的配电网是一个多电源的网络, 潮流的方向是随机变化的, 传统的过电流保护难以适应这一变化^[1-2]。基于多电源区域的配电网故障定位算法^[3-4]虽然能够解决保护选择性问题, 但是需要利用故障电流的功率方向与定义的正方向相比较, 以判断故障的搜索方向, 由于馈线上一般不装设电压互感器, 所以其应用领域受到限制。如考虑在馈线上增设电压互感器, 势必会增加保护算法成本及投资成本。DG 系统为了保证保护之间的配合, 通常需要限制 DG 的短路电流, 目前通常有 2 种措施: 一是限制 DG 容量^[5]; 二是采用限流器限制 DG 短路电流^[6]。这不但牺牲了 DG 运营商的利益, 而且违背了电力系统中“二次服务并服从一次”的原则。因此, 研究一种基于电流量的故障定位新算法是十分迫切和具有现实意义的。近几年的大电网^[7]停电事故使得广域保护控制^[8-9]成为国内外的研究重点。广域保护最大的优势在于掌握了电网中的全局信息, 将广域保护的概念引进 DG 中将可以解决传统电流保护不能解决的问题。基于此, 本文提出了一种新型电流保护方案。

1 DG 条件下的新型电流保护系统

1.1 新型电流保护的框架结构

在 DG 的配电系统中, 定义每个装设电流互感

器的地方都是一个分支, 每个分支的正方向为以母线指向线路(或 DG)。按照分支数量可分为多分支母线节点、3 分支母线节点、2 分支母线节点。3 分支节点又可分为中间节点、边缘节点。如图 1 所示, A 为变电站母线(其他出线省略没有标出)属多分支节点; C 属 3 分支节点中的中间节点, 其上下游都有电源; E 为 3 分支节点中的边缘节点, 其上游有电源, 下游无电源; B,D 为 2 分支节点。

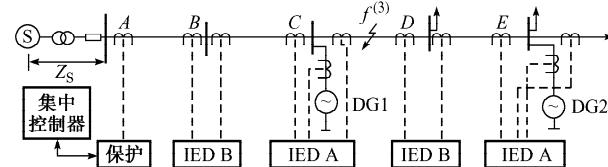


图 1 接入 DG 后的配电网馈线系统
Fig. 1 Primary system for the distribution network with DG

新型电流保护系统由变电站母线上的保护装置与各馈线段母线上的智能电子设备(IED)组成。根据各分段母线节点的区别, 相应 IED 的类型也有区别, IED A 处理 3 个分支的电流采样值, 用于故障搜索区域的定位, IED B 只处理 2 个分支的电流采样值, 用于对具体故障段定位; 故障发生时, IED A 先与保护通信, 找出故障搜索区域, 然后与该区域中的 IED B 通信。

1.2 电流综合幅值比较判断故障搜索区域

假设相间短路发生在系统中的母线 m, n 之间的 F 点时, 序网中包含正序网和负序网, 若不计负荷影响, 可得图 2 所示正序网图。

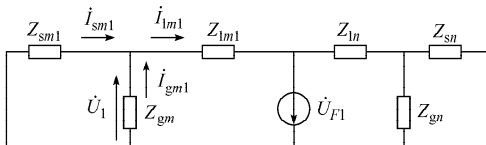


图 2 正序分量序网图

Fig. 2 Sequence network equivalent circuit diagram

假设 DG1 接入位置的母线在故障时刻的电压相量为 $\dot{U}_1 = U_1 \angle \gamma$, DG1 的阻抗为 $Z_{gm} = |Z_{gm}| \angle \alpha$, 系统的阻抗为 $Z_{sm} = |Z_{sm}| \angle \beta$, 则系统侧分支正序分量为:

$$\dot{I}_{sm1} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{sm1}} \angle (\gamma - \beta)$$

DG 侧分支正序分量为:

$$\dot{I}_{gm1} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{gm1}} \angle (\gamma - \alpha)$$

正方向指向故障点的分支的电流正序分量为:

$$\dot{I}_{lm1} = \dot{I}_{gm1} + \dot{I}_{sm1}$$

根据三角形的余弦定理可得:

$$|\dot{I}_{lm1}| = \sqrt{\dot{I}_{gm1}^2 + \dot{I}_{sm1}^2 + 2\dot{I}_{gm1}\dot{I}_{sm1}\cos|\alpha - \beta|}$$

由于系统和线路的阻抗以及发电机的暂态电抗都是感性的, 两者的阻抗相角差 $|\alpha - \beta| \approx 0$, 可得: $|\dot{I}_{sm1}| + |\dot{I}_{gm1}| \approx |\dot{I}_{lm1}|$ 。

由于正序网和负序网的相似性, 同理可以得到: $|\dot{I}_{sm2}| + |\dot{I}_{gm2}| \approx |\dot{I}_{lm2}|$ 。

从以上分析可得: 在 3 分支节点中, 正方向指向故障点的分支的电流正、负序分量幅值最大。

1.3 故障搜索方向的判据

以 BC 相两相故障为例, 根据边界条件可得:

$\dot{I}_{FA} = 0$, $\dot{I}_{FB} = -\dot{I}_{FC}$, $\dot{U}_{FB} = \dot{U}_{FC}$, $\dot{U}_{FA1} = \dot{U}_{FA2} = \dot{U}_{F|0|}/2$, $\dot{i}_{FA1} = -\dot{i}_{FA2}$ 。假设配电线路阻抗角为 60° , 由以上公式可以画出两相短路的序分量相量图如图 3 所示。

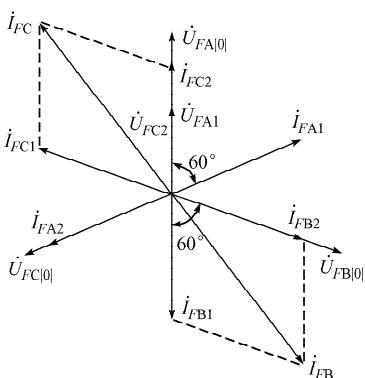


图 3 相间故障电流相量图

Fig. 3 Vector diagram for the phase-to-phase fault

从图 3 中可以看出, 两相短路电流为三相短路时的 $\sqrt{3}/2$ 倍^[10], 故两相短路时电流保护的灵敏度小于三相短路。本文引入电流综合幅值作为判据以提高灵敏度, 定义电流综合幅值为: 故障电流正序分量幅值与负序分量幅值的和, 即

$$|I_{ZH}| = |I_{F1}| + |I_{F2}|$$

三相短路时, $|I_{F2}| = 0$, 其电流的综合幅值为:

$$|I_{ZH}| = |I^{(3)}| = |I_{F1}| + |I_{F2}| = \frac{U_{F|0|}}{Z}$$

两相短路时, $Z_1 = Z_2 = Z$, 因此有:

$$|I_{F1}| = |I_{F2}| = \frac{U_{F|0|}}{Z_1 + Z_2} = \frac{U_{F|0|}}{2Z}$$

电流的综合幅值大小为:

$$|I_{ZH}| = |I_{F1}| + |I_{F2}| = \frac{U_{F|0|}}{Z} > |I_F^{(2)}|$$

即两相短路电流综合幅值大于其短路电流值, 提高了两相短路的灵敏度。综合 1.2 节中的结论, 对任何一个接入 DG 的 3 分支节点而言, 正方向指向故障点的分支上流过电流的综合幅值总是最大。在 IED A 中, 比较各分支的电流综合幅值大小, 以最大者分支的正方向为故障搜索的前进方向。

值得一提的是, 当配电馈线上发生故障时, 若 DG 接入的母线节点距离故障点较远, DG 的助增电流将很小, IED 可能对故障搜索方向误判, 增加辅助判据:

$$|I_{ZH}|_{max} - |I_{ZH}|_{sec} \geq 0.1 |I_{ZH}|_{sec}$$

式中: $|I_{ZH}|_{max}$ 为最大分支的幅值; $|I_{ZH}|_{sec}$ 为第二大分支的幅值。

若满足该判据可断定幅值最大分支的正方向为故障搜索的方向, 若以上条件不满足, DG 分支电流近似为 0, 则把这一节点转换为穿越性质的 2 分支节点处理, 执行 IED B 的处理程序。

2 故障搜索区域的矩阵定位算法

2.1 故障搜索区域定位的思想

1)首先规定从系统电源往线路末端的方向为系统正方向, 沿着这个正方向对线路上所有 3 分支节点的 IED A 进行编号, 变电所母线节点保护编号为 0, 将中间节点 IED 编号靠前, 而边界节点 IED 编号靠后。

2)故障发生后, IED 计算出各分支电流的综合幅值, 比较得出电流综合幅值最大的分支, 将该分支编号传送给保护装置。沿着该分支正方向继续向前搜索。

3)沿着故障搜索方向, 找到了下一个 3 分支节点, 若该节点中的故障搜索方向与系统正方向同向,

则沿着这个方向继续向前搜索;如果该节点中的故障搜索方向与系统正方向反向,则故障搜索区域落在这2个邻近的3分支节点之间。

保护的搜索过程并不是漫无目的地接收来自IED的任何信息,保护启动后,IED A首先执行差动保护算法,排除了分段母线故障的可能后,进行3分支的电流综合幅值大小比较,如果是DG分支故障,跳开DG分支开关,如果不是,才开始进行故障搜索区域的定位。

2.2 故障搜索中边缘节点的处理方法

如果IED A所处的分段母线是边缘节点,如图4(a)所示,母线上游发生故障时,不考虑负荷电流影响,只有2个分支出现过电流且幅值大小相等,无法判断是节点上游分支发生故障还是DG分支故障。如果节点距系统电气距离较远,且接入DG容量较大,DG分支的故障电流可能大于系统分支,将出现误判。此时要求DG分支装设快速保护^[11]。故障发生后,如DG分支并未被快速切除,则可排除DG分支故障,认为是分段母线的上游发生故障。

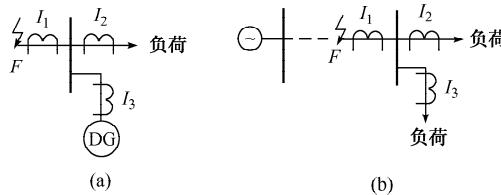


图4 故障状态下特殊节点分类
Fig. 4 Special node classes under fault state

如图4(b)所示的边缘节点,电源侧分支上游与系统电源相连,另外2个分支向纯负荷供电,当电源分支三相金属性故障时,3个分支电流综合幅值均为0,无法进行电流综合幅值比较。

IED A故障启动后,可以判断故障点一定发生在节点上游,即系统电源侧。若该节点处于故障搜索的正方向上,则直接利用下一步相位比较法对上游线段进行故障的准确定位。如电源侧分支直接与电源相连,则由电源侧相关保护,如DG分支的快速保护直接跳开电源分支切除故障。

2.3 故障搜索区域定位的矩阵算法

在保护装置中,存放一个网络描述矩阵 D_1 ,它描述的是每个IED A的邻接关系。

D_1 矩阵元素值的定义如下:

$$D_1 = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{02} & A_{03} \\ A_{10} & A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{20} & A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{30} & A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对角线上的元素 A_{ii} 为*i*号IED A的状态,为1表示IED正常运行,为0表示IED故障;如果第*i*个IED A与第*j*个IED A相邻接,那么 A_{ij} 为1,否则为0。

故障发生后,每一个IED A发送故障搜索的方向,保护根据这个方向对 D_1 修订,形成故障判定矩阵 D_p ^[12]。

形成 D_p 的步骤为:

1)在 D_1 第*i*行中, $A_{ii}=0$,则不进行任何操作,进行下一行操作。

2)若 $A_{ii}=1$,对编号为*i*的中间节点IED A,若其故障搜索方向指向编号为*j*的IED A,则除了 $A_{ij}=1$ 保持不变外,该行其他元素全部置0(即该行其他任何一个值为1的 A_{ik} (包括 A_{ii}),执行 $A_{ik}-1=0$ 的操作),逐行修改,直至所有元素全部处理完毕。

如下式所示:

$$D_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & [1] & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [1] & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3)对编号为*i*的边界节点的IED A,若其故障搜索方向在节点上游,则适用步骤2的规律, A_{ii} 的值被置0。若故障搜索方向指向线路的末梢(节点的下游),则 $A_{ii}=1$ 不变,该行其他元素全部置0(即该行任何一个值为1的 A_{ik} ($k \neq i$),执行 $A_{ik}-1=0$ 的操作),直至所有元素全部处理完毕。

如下式所示:

$$D_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & [1] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

故障搜索区域的判断方法为:得到了 D_p 后,将每一个 D_{ij} 与 D_{ji} 执行逻辑与运算。若 $D_{ij} \& D_{ji} = 1$,则可以判定故障搜索区域在分段母线 ij 之间。若边界节点 $D_{ii}=1$,表示故障点位于编号为*i*的IED A的下游。

2.4 实例分析

如图5所示, D_1 可以写成:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

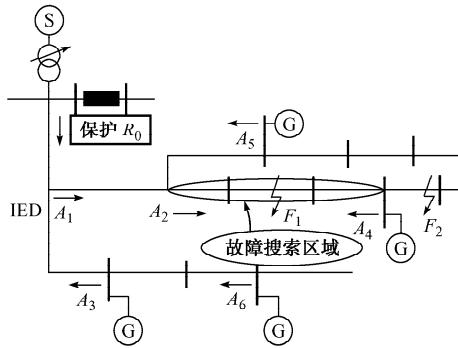


图 5 故障搜索区域的搜索示意图

Fig. 5 Schematic diagram for the fault searching region

以 F_1 发生故障为例, 保护接收所有 IED A 传送来的故障搜索方向, 对 \mathbf{D}_1 修订, 得到 \mathbf{D}_p , 然后对以对角线对称的元素执行逻辑与操作。如式(2)所示。

在 \mathbf{D}_p 中: ① $D_{01} \& D_{10} = 0$, 故障未发生在 R_0 与 A_1 之间; ② $D_{12} \& D_{21} = 0$, 故障未发生在 A_1 与 A_2 之间; ③ $D_{13} \& D_{31} = 0$, 故障未发生在 A_1 与 A_3 之间; ④ $D_{25} \& D_{52} = 0$, 故障未发生在 A_2 与 A_5 之间; ⑤ $D_{36} \& D_{63} = 0$, 故障未发生在 A_3 与 A_6 之间; ⑥ $D_{44} = 0$, 故障未发生在边界节点 A_4 的下游; ⑦ $D_{55} = 0$, 故障未发生在边界节点 A_5 的下游; ⑧ $D_{66} = 0$, 故障未发生在边界节点 A_6 的下游; ⑨ $D_{24} \& D_{42} = 1$, 故障发生在 A_2 与 A_4 之间。

以 F_2 故障为例, 对 \mathbf{D}_1 进行修订, 得到 \mathbf{D}_p , 对以对角线对称的元素执行逻辑与操作。如式(3)所示。

在 \mathbf{D}_p 中: ① $D_{01} \& D_{10} = 0$, 故障未发生在 R_0 与 A_1 之间; ② $D_{12} \& D_{21} = 0$, 故障未发生在 A_1 与 A_2 之间; ③ $D_{13} \& D_{31} = 0$, 故障未发生在 A_1 与 A_3 之间; ④ $D_{24} \& D_{42} = 0$, 故障未发生在 A_2 与 A_4 之间; ⑤ $D_{25} \& D_{52} = 0$, 故障未发生在 A_2 与 A_5 之间; ⑥ $D_{36} \& D_{63} = 0$, 故障未发生在 A_3 与 A_6 之间; ⑦ $D_{55} = 0$, 故障未发生在边界节点 A_5 的下游; ⑧ $D_{66} = 0$, 故障未发生在边界节点 A_6 的下游; ⑨ $D_{44} = 1$, 故障发生在 A_4 下游。

2.5 矩阵元素的自适应修改

配电系统中, DG 的投退由 DG 运营商决定, 这

就要求保护的定位算法具备自适应功能。假设 DG 退出运行或者 IED A 发生故障, 则需要修改 \mathbf{D}_1 。

1) 若 IED A 为中间节点, 节点 i 与节点 k, j, t 相邻, 有 $A_{ik}=1, A_{ij}=1, A_{it}=1$ ($k, j, t \neq i$)。IED A 发生故障时则修改 \mathbf{D}_1 , 置 $A_{kj}=A_{jk}=1, A_{kt}=A_{tk}=1, A_{jt}=A_{tj}=1, A_{ii}=0$, 并且置 $A_{ik}=A_{ki}=A_{ij}=A_{ji}=A_{it}=A_{ti}=0$ 。

2) IED A 为边界节点, 若 $A_{ij}=1$; 则置 $A_{ij}=A_{ji}=0, A_{ii}=0$ 。

保护将新形成的 \mathbf{D}_1 中的各个 IED 的邻接信息发送给该 IED A, 以便故障时, 各 IED 更改电流幅值最大分支正方向的下一个节点的编号。

3 故障线段准确定位的电流相位判别法

3.1 三相故障电流间相位关系

故障电流流经非故障线段时, 与负荷电流一样都是穿越性电流, 而故障电流流经故障段时则不然。本节利用线路段两端的故障电流正序分量与负荷电流的比相结果来完成故障点的准确定位, 避免了传统相位比较保护数据同步传输带来的困难。

如图 6 所示, 当 DE 线路段 F_1 点发生三相故障时, 故障电流中只有正序分量, 相量图如图 7 所示。

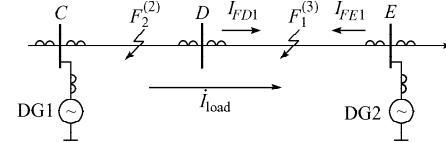
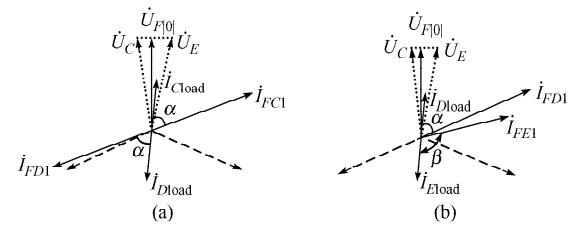


图 6 无 DG 接入的中间节点的系统

Fig. 6 Primary system diagram for the fault searching region between two three-branch nodes



→ 保护判据电流相量; - - - 参考相量 (包括电压相量)

图 7 故障电流正序分量和负荷电流相位关系

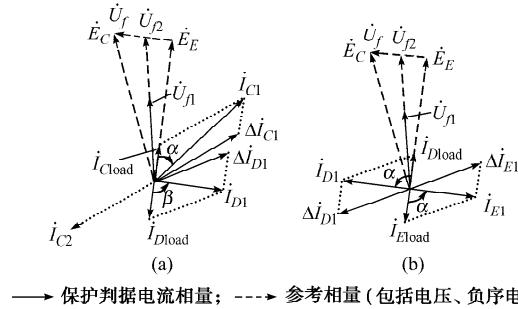
Fig. 7 Phase relationship graph between the fault current positive sequence component and load current

图 7(a)中, 非故障线路 CD 段中 C 侧故障电流 i_{FC1} 的相位滞后于负荷电流 i_{Dload} 角度 α , CD 段中 D 侧故障电流 i_{FD1} 相位滞后于负荷电流 i_{Dload} 角度 α ; 反观故障线路 DE , 见图 7(b), DE 段中 D 侧故障电流 i_{FD1} 的相位滞后于负荷电流 i_{Eload} 角度 α , 而 DE 段中的 E 侧故障电流 i_{FE1} 超前于负荷电流 i_{Eload} 角度

度 $\beta \approx \pi - \alpha$ 。

3.2 两相故障电流间相位关系

如图 8 所示,当 CD 线段 F₂ 点发生两相故障时,相量图如图 8 所示。



→ 保护判据电流相量; ---> 参考相量(包括电压、负序电流)

图 8 F₂ 点 BC 相短路时 A 相电流相量图

Fig. 8 Phase A current vector diagram when BC faults occur at F₂ point

当 BC 两相故障时,故障电流中既有正序分量也有负序分量。故障电流正序突变量 Δi_{F1} 始终滞后于故障点电压 \dot{U}_{FA} , 故障电流正序分量中有负荷电流分量,而负荷电流与故障电流相比,显得很小,对正序分量的相位影响很小。根据以上的分析画出电流相位关系图,见图 8(a)。故障段 CD 中 C 侧分支电流正序分量 i_{C1} 滞后于负荷电流 i_{Dload} 角度 α , CD 段中 D 侧分支电流正序分量 i_{D1} 超前于负荷电流 i_{Dload} 角度 β ;角度 α 与 β 大小与负荷电流大小有关系,负荷较小时满足 $\alpha + \beta \approx \pi$,负荷电流较大时, α 和 β 大小将减小。反观非故障段 DE,见图 8(b),DE 段中 D 侧分支故障电流正序分量 i_{D1} 的相位超前于负荷电流 i_{Dload} 角度 α ,DE 段中 E 侧分支故障电流正序分量 i_{E1} 也超前于负荷电流 i_{Eload} 角度 α 。

综合两相短路和三相短路的情况可以看出:非故障段两端的故障电流正序分量始终同时超前或者同时滞后于负荷电流;而故障段一端的故障电流正序分量超前于负荷电流,另一端的故障电流正序分量滞后于负荷电流。这就是故障段和非故障段的区别。利用这个特点可以轻易地在故障搜索区域中找出真正的故障段。

在对故障点定位中,需要利用负荷电流作为两端电流正序分量的基准进行比相,如果线段上刚好没有负荷电流,则先不进行该段线路的比相,而等待其他线段的比相结果,如果其他段经判断后无故障,则可认为无负荷电流线路故障,断开其两端开关,将系统解列为孤岛运行方式,断开后的 2 个系统由于功率依旧平衡,仍然可以稳定运行。

3.3 故障点准确定位的矩阵算法

事先根据故障搜索区域(见图 6 分段母线 C,E 之间)的母线 IED B 的连接关系用以下网络描述矩阵 D_2 表示:

$$D_2 = \begin{bmatrix} A_1 & D_{12} & 0 & 0 \\ D_{21} & B_2 & D_{23} & 0 \\ 0 & D_{32} & B_3 & D_{34} \\ 0 & 0 & D_{43} & A_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

D_2 各个元素定义为:① A_i 定义为 i 号 IED A 的工作状态,若 IED 正常则置 $A_i = 1$,若 IED 故障,无法发送信息,则置 $A_i = 0$;② B_j 定义为 j 号 IED B 的工作状态,若 IED 正常则置 $B_j = 1$,若 IED 故障,无法发送信息,则置 $B_j = 0$;③ D_{ij} 定义为第 i 号 IED 中正方向指向 j 号 IED 的分支工作状态,若 2 个 IED 相邻则置 $D_{ij} = 1$,若不相邻则置 $D_{ij} = 0$ 。

保护查询故障搜索区域中所有 IED 的各个分支的电流间相位关系,然后对 D_2 进行修改,得到故障判断矩阵 D_q 。修改的方法如下:

1) 若流过 D_{ij} 分支的电流正序分量超前于负荷电流则置 $D_{ij} = 1$,若滞后则置 $D_{ij} = 0$ 。

2) 若故障前 D_{ij} 分支上并没有负荷电流流过,置 $D_{ij} = -1$ 。

故障段的判断方法如下:

1) 在 D_q 中,若 $D_{ij} \neq -1$ 且 $D_{ij} \oplus D_{ji} = 1$,则该线段为故障段;若 $D_{ij} \neq -1$ 且 $D_{ij} \oplus D_{ji} = 0$,则该线段为非故障段;若 $D_{ij} = -1$ 且 $D_{ji} = -1$,该段线路无负荷电流流过。

2) 若 $D_{ij} = -1, D_{ji} = -1$,将线段 ij 段视为“无负荷线段”,不进行电流间相位关系比较,等待其他线路的判断结果。若第 i 号 IED B 发生故障,无法发送信息给保护,此时置 $B_i = 0$,置所有 $D_{ik} = 0, D_{ki} = 0$,将与 i 号 IED B 相邻的线段作为无负荷线路处理,等待其他线段的判断结果。若其他段线路都是非故障的,则将所有被视为“无负荷线段”的首末开关都断开。

以图 9 为例进行分析, D_2 为:

$$D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

故障搜索区域中的各个 IED 将电流间的相位关系(超前或滞后)发送给保护装置后,保护修改 D_2 得到 D_q :

$$D_q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & [1] \\ 0 & 0 & [0] & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

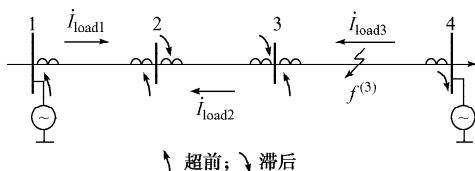


图 9 故障搜索区域中电流间相位关系

Fig. 9 Phase relationship between currents in the fault searching region

其中: $D_{12} \neq -1$ 且 $D_{12} \oplus D_{21} = 0$, 则线段 12 为非故障段; $D_{23} \neq -1$ 且 $D_{23} \oplus D_{32} = 0$, 则线段 23 为非故障段; $D_{34} \neq -1$ 且 $D_{34} \oplus D_{43} = 1$, 则线段 34 为故障段; $A_1 = A_4 = B_2 = B_3 = 1$, 表示 1, 2, 3, 4 号 IED 功能完好。

4 新型电流保护的工作流程及特点

新型电流保护的工作流程见附录 A, 特点为:

1) 保护的动作过程分为故障区域搜索和故障段准确定位 2 个阶段, 减少了无用节点信息在网络上传输, 减轻了保护负担, 节省了保护判断故障点的时间。

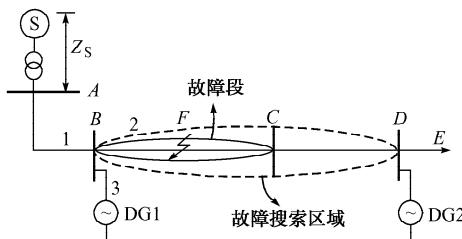
2) 采样数据在当地就得到处理, 无需数据同步, 网络中传送的是 IED 的判断结果, 而不是电流初始采样值, 减轻了网络负担。

3) 保护无需装设电压互感器, 但保护依赖于通信, 保护的速动性、可靠性依赖于网络。

4) 保护根据配电网中需要故障定位的最小准确区段要求尽可能减少配置电压互感器。当电压互感器发生故障时, 可以由相邻节点以扩大的故障区段进行故障区段的搜索定位, 起到后备保护的功能。

5 算例仿真

以图 10 所示系统建立数字仿真模型, 进行 MATLAB 仿真, 参数如下: 变压器变比 110/11, 容量 60 MVA, $Z_S = j0.598 \Omega$, $Z_{AC} = (0.75 + j1.57) \Omega$, $Z_{CF} = (0.3 + j0.628) \Omega$, $Z_{FD} = (0.3 + j0.628) \Omega$, $Z_{DE} = (0.75 + j1.57) \Omega$, DG 容量均为 0.5 MVA, 母线的负荷为 $(0.6 + j0.12) \text{ MVA}$ 。

图 10 仿真系统
Fig. 10 Simulation system

5.1 电流综合幅值大小比较

给 3 分支节点上游分支编号为 1, 下游分支编号为 2, DG 分支编号为 3。以母线 B 为观测点, 进行 3 个分支的电流综合幅值比较的仿真, 结果见附录 B 图 B1。其他各种故障类型的仿真结果见附录 B 表 B1。数据显示: 不管在 BC 段发生何种故障, 总是第 2 分支的电流综合幅值 I_{ZH2} 最大, 当故障点离 3 分支节点越远时, 各分支的电流大小差异越小, 故障发生在 CD 段时比发生在 BC 段时电流综合幅值较小, 幅值差也小。

5.2 电流间相位关系比较

故障段 BC 两端的电流间相位相反, 一端超前于负荷电流, 另一端滞后于负荷电流, 并且相角差几乎是互补的。而在非故障段 CD 两端的正序电流相位, 两端都滞后于负荷电流, 结果见附录 B 图 B2。

各种故障类型情况下仿真获得的电流间相位关系的数据见附录 B 表 B2。数据表明: 由故障段两端分支计算出的电流间相角差是异号的, 一个超前, 一个滞后, 并且相角差大小受负荷电流的影响; 而由非故障段两端分支计算出的电流间的相角差是同号的, 同为超前, 或同为滞后。如 CD 段故障时 BC 段两端的相角都为接近 51° , 两端同为超前, 如 BC 段故障时, CD 段两端的相角都为稍小于 -120° , 两端同为滞后。

另外, 即使故障发生在 CD 段, 电流综合幅值以第 2 分支最大, 电流间的相位关系十分准确地反映故障点的变化。

6 结语

目前, 对分布式发电条件下的保护的研究尚处于探索阶段。本文根据广域保护的概念提出了新型电流保护策略, 从分布式发电条件下的配电网网络结构和故障电流的特点出发, 分别提出了能自适应于现实情况的故障搜索区域定位的矩阵算法和故障段定位的矩阵算法, 避免了矩阵乘法运算, 简单实用; 对故障搜索方向的判据和电流间相位关系的判据进行了详细论证, 具有一定的理论和实践价值。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] IEEE 1547TM—2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. 2003.
 - [2] 梁才浩, 段忠献. 分布式发电及其对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
- LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and

- its impact on power system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [3] 刘健,倪建立,杜宇.配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法.电力系统自动化,1999,23(1):31-33.
LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A united matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [4] 王飞,孙莹.配电网故障定位的改进矩阵算法.电力系统自动化,2003,27(24):45-47.
WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-47.
- [5] LU Yuping, HUA Lidan, WU Ji'an, et al. A study on effect of dispersed generator capacity on power system protection// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE: 6p.
- [6] 吴罡,陆于平,花丽丹,等.分布式发电采用故障限流器对继电保护性能的影响.江苏电机工程,2007,26(2):1-4.
WU Gang, LU Yuping, HUA Lidan, et al. Impact of fault current limiter to the performance of relay protection in distributed generation. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(2): 1-4.
- [7] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示.电力系统自动化,2003,23(18):1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003. Automation of Electric Power Systems, 2003, 23(18): 1-5.
- [8] 王阳光,尹项根,游大海.遵循 IEC 61580 标准的广域电流差动保护 IED.电力系统自动化,2008,32(2):53-57.
WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai. Development of wide area current differential protection IED conforming with IEC 61580. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 53-57.
- [9] 苗世洪,刘沛,林湘宁.基于数据网的新型广域后备保护系统实现.电力系统自动化,2008,32(10):32-36.
MIAO Shihong, LIU Pei, LIN Xiangning. A new type of backup protective system in wide area network based on data network. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 32-36.
- [10] 李哲,张保会.一种利用序分量原理提高电流保护灵敏度的算法.电力系统自动化,2000,24(1):26-29.
LI Zhe, ZHANG Baohui. A new theory to improve the sensitivity of current protection by sequence components. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 26-29.
- [11] 易新,陆于平.分布式发电条件下配电网孤岛划分算法.电网技术,2006,30(7):50-54.
YI Xin, LU Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators. Power System Technology, 2006, 30(7): 50-54.
- [12] 卫志农,何桦,郑玉平.配电网故障定位的一种新算法.电力系统自动化,2001,25(14):48-50.
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A novel algorithm for fault location in power distribution network. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50.

林 霞(1975—),女,通信作者,博士研究生,主要研究方向:分布式发电系统保护及控制。E-mail: boulevard2@seu.edu.cn

陆于平(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护及分布式发电系统保护及控制。

王联合(1981—),男,硕士研究生,主要研究方向:分布式发电系统保护及控制。

New Current Protection Scheme Considering Distributed Generation Impact

LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In the distribution network with distributed generation (DG), the single-source radiate network based protection scheme is no longer suitable and loses its original protection coordination. Based on multi-DG distribution network structure and fault current characteristics, this paper proposes a new adaptive fault location method which can be used for current protection design. This new current protection scheme includes two steps: first, the fault search direction is obtained through current magnitude comparison; this will narrow down the possible fault region within two three-branch buses. Secondly, phasor relationship between current positive sequence component and load current at the both ends of the feeder is used to locate the fault section along the feeder. This is realized in an adaptive fault searching region lock matrix algorithm, which avoids the matrix multiply operation. This is simple and practical. The validity of the proposed protection algorithms is verified by the simulation result.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50577006).

Key words: distributed generation (DG); fault searching direction; fault searching region; fault location

附录 A 新型电流保护的工作流程

新型电流保护的工作流程包括 3 个阶段：

第 1 阶段，各个 IED 执行差动保护算法，切除发生在分段母线上的故障，排除了母线故障的可能；

第 2 阶段，各个 IED A 通过计算电流综合幅值大小确定故障搜索方向，保护根据各 IED A 发送的故障搜索方向修改 D_1 矩阵得到 D_P 矩阵，通过 D_P 矩阵对角线元素的“与”运算得到故障搜索区域，详细流程如图 A1 所示。

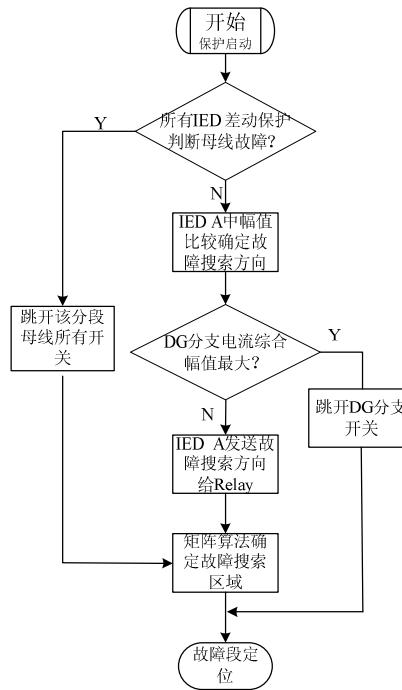


图 A1 保护故障区域搜索流程图
Fig.A1 Flowchart for the fault searching region lock

第 3 阶段，在故障搜索区域中，根据各 IED B 和首末 IED A 传送来的故障电流正序分量及负荷电流间相位关系修订 D_2 矩阵，将故障前无负荷电流的线路段和有负荷线路区分开，先判断有负荷线路是否发生故障，若有负荷线路判断发生故障，则切除该线路，若无故障，则断开所有无负荷线路段，系统解列为孤岛运行方式，由于故障前线路无负荷，所以孤岛的功率是平衡的，仍然可稳定运行。其详细流程如图 A2 所示。

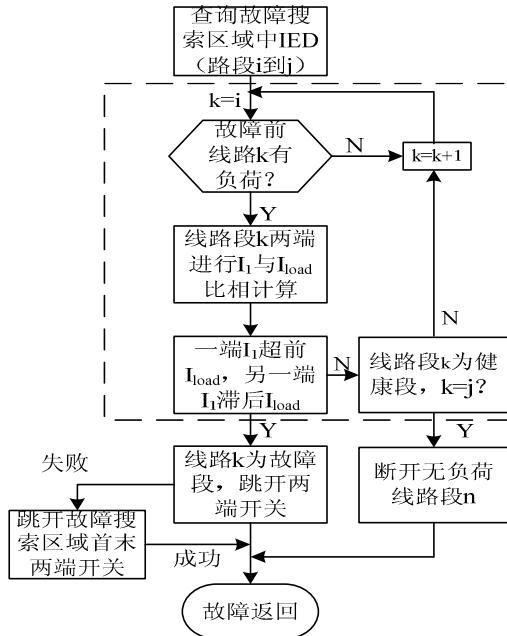


图 A2 保护故障定位隔离流程图
Fig.A2 Flow chart for the fault feeder section location

附录 B

以下图表中幅值单位为 A，相位单位为 (°)。

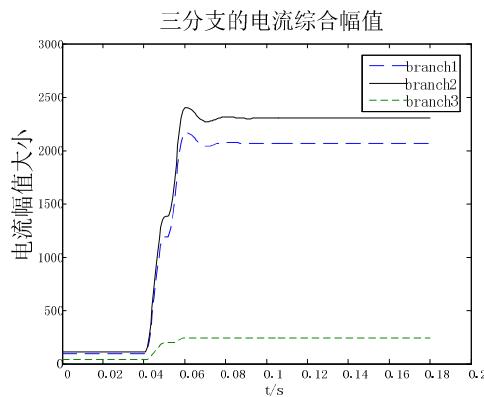
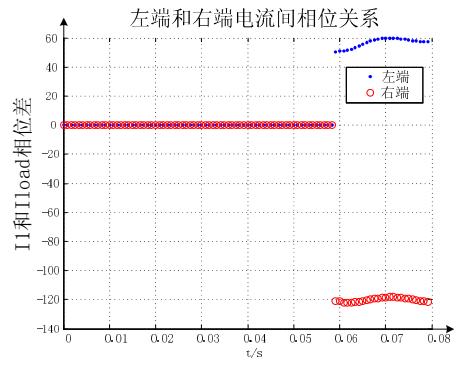


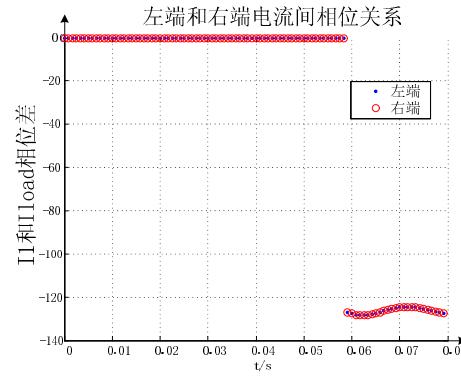
图 B1 三个分支的电流综合幅值大小
Fig.B1 Three branch fault current composite magnitude value comparison result

表 B1 B 母线三分支电流综合幅值大小
Table B1 Three branch fault current composite magnitude value for bus B

故障类型	I_{ZH1}	I_{ZH2}	I_{ZH3}	$ I_1 _2$	$ I_2 _2$
三相短路	2067	2298	241	2298	0
AB 短路	2068	2300	244	1186	1115
BC 短路	2068	2302	242	1184	1116
CA 短路	2070	2304	246	1186	1116



(a) BC 段



(b) CD 段

图B2 电流间相位关系
Fig.B2 Phase relationship between section both ends currents

表 B2 各种故障类型的电流间相位关系
Table B2 Phase relationship between currents of every kind of fault

故障类型	BC 段左端	BC 段右端	CD 段左端	CD 段右端
三相短路	+58.1	-120.5	-128.2	-128.1
AB 短路	+55.6	-111.3	-120.1	-120.2
BC 短路	+56.7	-110.1	-120.1	-120.2
CA 短路	+55.5	-111.2	-120.0	-119.8