

在配电网中发生单相接地故障时不借助电压互感器计算 残余电压角度的方法

李容, 任睿, 宋聚忠

(施耐德电气中国技术中心, 上海 201114)

摘要: 在配电网中发生单相接地故障时, 为了判定故障的方向, 仅仅利用电流判据经常是不够的。如果能够得到残余电压的角度信息, 再配合电流判据一起使用, 就能够得到比较准确的结果。鉴于安装电压互感器的额外成本, 配电网线路中往往只安装电流互感器。于是, 基于带电指示器的低成本和可以获得电压角度的特性, 提出了一种利用带电指示器来估算残余电压角度的方法。首先针对各种中性点接地的配电网进行归类, 然后提出各自的计算方法。经过 EMTP/ATP 和 Matlab 协同仿真验证表明, 获得的残余电压角度用于单相接地故障定位有良好的精度。值得一提的是本方法同样适用于带有分布式电源的配电网。

关键词: 残余电压; 故障定位; 线路故障指示器; 单相接地; 中性点接地; 分布式电源

A method to compute residual voltage angle without voltage transformers during single phase earth fault in distribution network

LI Rong, REN Rui, SONG Juzhong

(Schneider-Electric China Technology Center, Shanghai 201114, China)

Abstract: During single phase earth faults in distribution networks it is often insufficient to use current information only to perform directional fault detection. If the residual voltage angle is also available, the fault direction can be identified more easily. Due to the additional cost of voltage transformers they are often not available in distribution networks. This paper presents a method to estimate residual voltage angle with low-cost voltage presence indication system. The distribution networks are classified into groups according to their neutral earthing types. Different calculation methods are given for each group. The calculation methods have been validated by co-simulation with EMTP/ATP and MATLAB. The result shows that directional fault detection of single phase earth fault with the estimated residual voltage angle can achieve a promising accuracy. This method can also be applied in distribution networks with distributed energy resources.

Key words: residual voltage; directional fault detection; fault passage indicator; single phase earth fault; neutral earthing; distributed energy resource

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0143-07

0 引言

单相接地故障是指多相电力系统中某一相的导体对地发生短路而引起的故障。为了准确地判断对地短路点的位置以便有选择性地切除故障线路, 缩小停电的范围, 目前国外线路广泛采用的是利用故障指示器来判断故障的方向^[1-3]。例如, 在故障指示器的电源侧发生故障, 指示器亮红灯; 而在故障指示器的负荷侧出现故障, 故障指示器亮绿灯, 或者不亮灯。目前针对中性点直接接地或者经小电阻接

地的配电网, 由于单相接地故障时, 靠近电源中性点侧的设备测量到的残余电流较大, 所以很容易通过设定残余电流阈值, 来区分故障是发生在故障指示器的电源侧, 还是负荷侧。

然而随着分布式能源的接入, 改变了配网线路中只有一侧有能源接入的情况。部分通过中性点接地的并网变压器接入电网的分布式能源甚至改变了故障时系统的零序网, 造成接地故障时, 故障点两侧都有较大的残余电流, 因此无法通过单纯比较残余电流大小来实现故障定位^[4-6]。与此情况类似的是

采用中性点消弧线圈接地或者不接地系统中, 由于接地故障时故障的两侧都仅仅有较小的残余电流, 也无法仅用电流门槛值加以区分方向。

在上述情况中, 如果能够同时获得残余电压的角度, 配合残余电流的角度, 就可以方便地用继电保护设备中常用的方向接地过流保护(ANSI67N)来准确地实现故障定位。但是鉴于电压互感器在线路中较少安装, 所以残余电压如何获得便成了一个问題。相比之下, 由于带电指示器的成本低廉, 往往可以在线路中大量安装。

带电指示器的原理是基于电容分压器, 对于获得的电压角度可以近似的认为和安装处的电流角度成 90° 超前关系。此关系在单相接地故障时对三相线路电流仍旧成立。本文利用此规律和不同中性点接地系统中发生单相接地故障时三相电压和残余电压角度之间的关系, 计算出残余电压的角度, 解决了残余电压角度由于缺少电压互感器而无法获得的问题。

1 单相接地故障时电压间的关系

在发生单相接地故障时, 根据系统零序阻抗的不同, 三相电压也和残余电压的角度成不同的关系。系统的零序阻抗主要和配电网中变压器的中性点接地方式有关。

对于配网中的变压器中性点接地的种类, 根据发生接地故障时流经中性点电流的大小, 可分为中性点有效接地方式(包括中性点直接接地, 经小电阻接地)和中性点非有效接地方式(包括中性点不接地, 高阻接地和经消弧线圈接地等)两类。如果是有多分布电源通过并网变压器接入的配电网, 为了论述的方便, 如果分布电源的并网变压器在配电网侧的中性点接地, 则假设所有的分布电源并网变压器中性点的接地方式都是相同类型的。

根据上述原则, 考虑到系统电源变压器和分布电源的并网变压器可能采用不同的中性点接地方式, 将所有可能的组合用两种情况表示:

1) 中性点非有效接地的配电网(全部变压器的中性点都是非有效接地);

2) 中性点有效接地的配电网(系统中只要有一个变压器的中性点接地是有效接地, 则整个系统的接地方式都为有效接地)。

下面分别针对这两种情况来分别给出相应的假设和基于假设的估算方法。

2 中性点非有效接地方式的计算方法

在中性点非有效接地的配电网中发生单相接地故障时, 三个相间电压仍然保持平衡, 即幅值相等, 角度彼此相差 120° , 写成数学表达式则有

$$\begin{cases} \dot{V}_A - \dot{V}_B = \alpha(\dot{V}_B - \dot{V}_C) \\ \dot{V}_B - \dot{V}_C = \alpha(\dot{V}_C - \dot{V}_A) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, j 为虚数单位; \dot{V}_A 为 A 相

对地电压, $\dot{V}_A - \dot{V}_B$ 为 AB 相间电压, 也称为线电压, 其他依此类推。

下面将对以上的方程式进行分析, 准备求解。为了书写和表达的方便, 对电压幅值的表达做以下约定:

$$\begin{aligned} |\dot{V}_A| &= \sqrt{(\text{Re}\{\dot{V}_A\})^2 + (\text{Im}\{\dot{V}_A\})^2} = FA \\ |\dot{V}_B| &= \sqrt{(\text{Re}\{\dot{V}_B\})^2 + (\text{Im}\{\dot{V}_B\})^2} = FB \\ |\dot{V}_C| &= \sqrt{(\text{Re}\{\dot{V}_C\})^2 + (\text{Im}\{\dot{V}_C\})^2} = FC \end{aligned}$$

式中, 用 FA 、 FB 、 FC 来分别表示三相电压的幅值。

为了简化复数的表示, 对实部和虚部的表达做以下约定:

$$\begin{aligned} \text{Re}\{\dot{V}_A\} &= \text{Re}V_a \\ \text{Im}\{\dot{V}_A\} &= \text{Im}V_a \end{aligned}$$

式中, $\text{Re}V_a$ 和 $\text{Im}V_a$ 分别表示 A 相电压的实部和虚部, 对 B 相和 C 相也做类似约定。

在式(1)中, 如果将每个复数方程分别写成实部和虚部, 会得到 4 个方程, 但是未知数有 6 个, 所以暂时还无法求解。

因为最终目的是获得相电压和残余电压之间的角度关系, 在这当中, 我们仅仅关心电压的角度和幅值的相对关系——也就是说, 绝对幅值的信息并不重要, 所以可以不失一般性的将其中某一相, 例如 B 相的电压幅值归一化处理: $FB = 1$ 。

因为通过带电指示器可以获得每一相在发生接地故障时的电压角度, 所以对于 B 相电压的实部和虚部可以借助幅值和 B 相电压角度 φ_B 表达为以下形式:

$$\begin{aligned} \text{Im}V_b &= FB \cdot \sin\varphi_B = 1 \cdot \sin\varphi_B = \sin\varphi_B \\ \text{Re}V_b &= FB \cdot \cos\varphi_B = 1 \cdot \cos\varphi_B = \cos\varphi_B \end{aligned}$$

有了以上的结果, 式(1)中的未知数减少到 4 个, 经过求解得到以下结果:

$$\operatorname{Re}V_c = k_3 / k_4$$

$$\operatorname{Im}V_c = \operatorname{Re}V_c \cdot \tan(\varphi_c)$$

$$\operatorname{Re}V_a = k_1 \cdot \operatorname{Re}V_c + k_2$$

$$\operatorname{Im}V_a = \operatorname{Re}V_a \cdot \tan(\varphi_A)$$

式中, $k_1 \sim k_4$ 解方程可得。

现在 3 个相电压已经全部求得, 结合残余电压的定义, 残余电压的角度可以表达如下:

$$\varphi_{VR} = \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}V_a + \operatorname{Im}V_b + \operatorname{Im}V_c}{\operatorname{Re}V_a + \operatorname{Re}V_b + \operatorname{Re}V_c} \right)$$

3 中性点有效接地方式的计算方法

对于中性点有效接地的电网, 单相接地故障时, 线电压平衡的假设不再成立。因此, 必须从三相电压的其他关系中来寻求残余电压的角度。

因为还是只关心角度信息, 所以依旧将 B 相电压的幅值 FB 规定为 1。经过在 EMTP/ATP 中大量仿真发现, 在 A 相单相接地故障时, 非故障相 B 相和 C 相电压的幅值之比在一个比较小的区间 [0.67, 1.05] 内变动。令这两项的比值 $FB/FC = CR$, CR 的分布如图 1 中曲线所示。

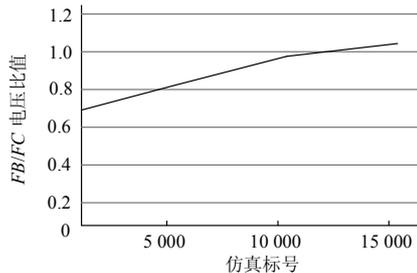


图 1 仿真中 CR 的取值范围

Fig. 1 Ratio of two healthy phase voltage (V_B/V_C) amplitudes, X-axis is the simulation index

在后面的计算中, 不失一般性地将 CR 固定在上述区间的一个比值, 比如 1.0 上。因为 $FB = 1$, 这样就得到了 C 相电压的幅值 $FC = FB/CR$ 。

接下来要得到残余电压的角度, 因为 FB 和 FC 都为已知, 只要再从一个表达式中得出 A 相电压幅值 FA 即可。

理论研究表明, 负序阻抗由配电网本身确定并且几乎不受线路分布电容、接地故障的接地电阻以及中性点接地类型的影响^[7]。因此, 在负序电流和负序电压之间存在着稳定的关系。在负序电压 V_2 中也包括一组三相电压的关系, 负序电流 I_2 可以通过三相电流互感器测得的相电流计算得到。接下来, 如果能够得到装置安装处的负序阻抗角, 就可以得

到负序电压的角度。有了负序电压的角度, B、C 两相电压的角度和幅值都是已知信息, A 相电压角度也可以从带电指示器获得, 就得到了所需的表达式, A 相电压的幅值 FA 就可以求得。

3.1 典型故障指示器的位置对于负序阻抗的影响

发生接地故障时, 装置处的负序阻抗取决于从以故障点为出发点着眼, 装置背后的网络。对于安装在网络中不同位置的故障指示器, 负序阻抗的决定因素可以是不同的。根据决定负序阻抗的主要矛盾, 故障指示器的安装位置大致可以分为以下三类, 如图 2 中 D1~D3 所示。

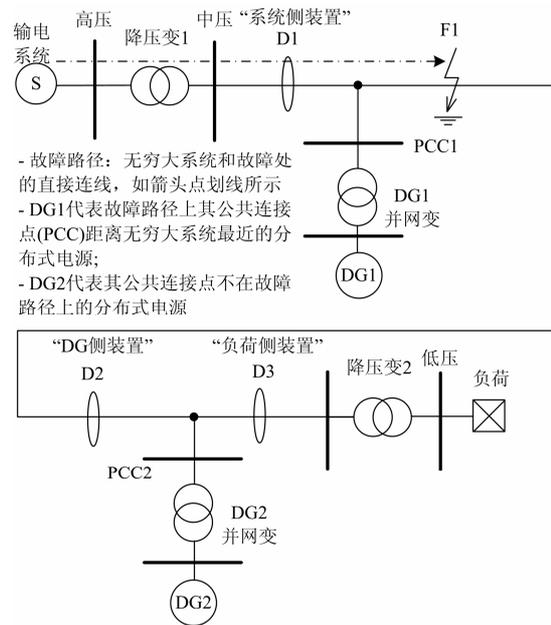


图 2 带有分布式电源的配电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single phase EF in a network with DG

图 2 中的 3 类装置位置的选择依据如下。

1) 系统侧装置 D1: 在 F1 处发生单相接地故障时, 因为装置背后的网络包含上游输电系统(也有可能包含分布式电源), 网络中的负荷是以并联的方式连接在电路上, 因为负荷负序阻抗远大于其他原件, 所以在计算 D1 背后的负序阻抗时, 不考虑负荷的影响。

2) DG 侧装置 D2: 装置背后的网络包含分布式电源和负荷, 同样因为负荷的阻抗远大于分布式电源的阻抗, 因此 D2 背后的负序阻抗也可以忽略负荷的影响。

3) 负荷侧装置 D3: 装置背后的网络只包含负序阻抗较高的负荷。

根据不同的典型位置处的装置应该检测到的故

障方向，和对装置背后的负序阻抗起决定性作用的原件，将装置 D1~D3 总结如表 1。

表 1 装置安装典型位置

Table 1 Typical location of device installation

装置位置类型	应该检测到故障的方向	负序阻抗主要决定因素
系统侧装置 D1	正向	电源、线路、变压器
DG 侧装置 D2	反向	电源、线路、变压器
负荷侧装置 D3	反向	负荷

3.1.1 系统侧装置 D1 背后的负序阻抗角

在图 3 的网络中，在 F1 处发生单相接地故障，测量和线路故障指示器安装在 D1 处。

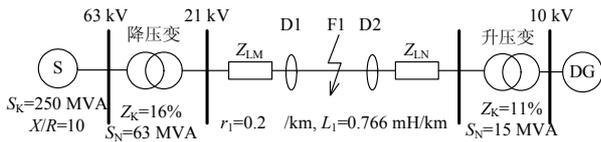


图 3 单相接地故障网络示意图，适用于系统和 DG 侧装置

Fig. 3 Single-phase EF in phase A in distribution line mode, for grid and DG device

图中： S_k 表示上游输电系统的短路容量； Z_k 表示变压器的短路阻抗百分比； S_N 是变压器的额定容量； r_1 表示线路每公里阻抗； L_1 表示线路每公里电感。

适用于图 3 中网络的负序网络如图 4 所示。

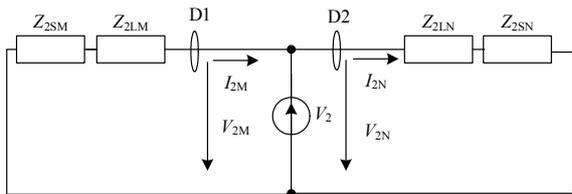


图 4 系统侧和 DG 侧装置的负序网络

Fig. 4 Negative sequence network for Grid & DG device

图 4 中： Z_{2SM} 是系统的电源阻抗，包含降压变压器的负序短路阻抗； Z_{2LM} 是降压变压器到装置 D1 间的线路阻抗； I_{2M} 是装置 D1 从测量结果计算出的负序电流； V_{2M} 是装置 D1 的负序电压； V_2 是故障点的负序电压； Z_{2SN} 是 DG 侧的电源阻抗，包含发电设备和升压变压器的负序短路阻抗； Z_{2LN} 是升压变压器和装置 D2 之间的线路负序阻抗； I_{2N} 是装置 D2 从测量结果计算出的负序电流； V_{2N} 是装置 D2 处的负序电压。

对装置 D1，有

$$\dot{V}_{2M} = -\dot{I}_{2M} \cdot (Z_{2SM} + Z_{2LM})$$

式中： Z_{2SM} 包含了系统的电源阻抗和降压变压器的阻抗，可由图 3 中的参数得到高压侧的值为

$$Z_{2SM_HV} = (2.57 + j25.7)\Omega$$

把高压侧的阻抗 Z_{2SM_HV} 折算到中压侧有

$$Z_{2SM} = \frac{(2.57 + j25.7)\Omega}{(63 \text{ kV} / 21 \text{ kV})^2} = (0.29 + j2.86)\Omega$$

接下来，对于线路负序阻抗 Z_{2LM} 的计算必须考虑两种极端情况：

1) 装置 D1 直接安装在降压变压器的下游，两者之间的线路长度接近于 0 km，就有

$$Z_{2M} = Z_{2SM} + Z_{2LM} = Z_{2SM} \geq \varphi_{Z_{2M}} = \text{atan}\left(\frac{2.86}{0.29}\right) = 84^\circ$$

2) 装置 D1 安装在远离降压变压器的下游，因为中压配电网中，处于经济的考虑，送电距离通常不会超过 30 km：

$$Z_{2LM} = z_{l2} \cdot 30$$

式中， z_{l2} 是每公里线路的负序阻抗^[8]。

$$Z_{2M} = Z_{2SM} + z_{l2} \cdot 30 = (6.29 + j10.06)\Omega$$

$$\varphi_{Z_{2M}} = \text{atan}\left(\frac{10.06}{6.29}\right) = 58^\circ$$

基于以上两种的极端情况取折中，得到 D1 背后的负序阻抗角为

$$(84^\circ + 58^\circ) / 2 = 70^\circ$$

3.1.2 DG 装置 D2 背后的负序阻抗角

装置 D2 背后的负序阻抗角的计算仍然基于图 4，对于 D2，有

$$\dot{V}_{2N} = \dot{I}_{2N} \cdot Z_{2N} = \dot{I}_{2N} \cdot (Z_{2SN} + Z_{2LN}) = \dot{I}_{2N} \cdot Z_{2N}$$

类似于对 D1 的计算，D2 背后负序阻抗角的范围也是属于 $[58^\circ, 84^\circ]$ ，所以对于 D2 来说，它背后的负序阻抗角也是 70° 。

3.1.3 负荷侧装置 D3 背后的负序阻抗角

装置 D3 背后的负序网络如图 5 所示。

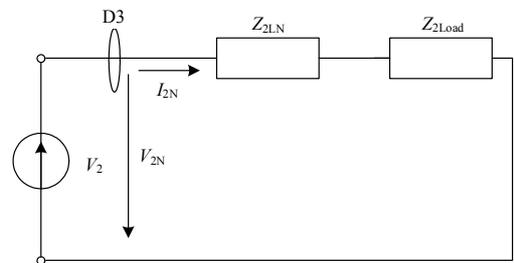


图 5 负荷侧装置背后的负序网络

Fig. 5 Negative sequence network for load device

如前所述，D3 的阻抗主要由负荷决定：

$$\dot{V}_{2N} = \dot{I}_{2N} \cdot Z_{2N} = \dot{I}_{2N} \cdot (Z_{2_Load} + Z_{2LN}) \approx \dot{I}_{2N} \cdot Z_{2_Load}$$

如果取负荷的功率因数为 0.9, 那么负荷的负序阻抗角就是 $\arccos(0.9) = 26^\circ$ 。

3.2 典型故障指示器位置的残余电压角度的计算

基于以上求得的 3 个典型位置的装置背后的负序阻抗角, 残余电压的角度可以分别按照以下方法来进行计算。

3.2.1 计算系统侧装置 D1 的残余电压角度

从 D1 的负序电压表达式:

$$\dot{V}_{2M} = -\dot{I}_{2M} \cdot (Z_{2SM} + Z_{2LM})$$

可以得到

$$\varphi_{V_{2M}} = \varphi_{I_{2M}} + 180^\circ + \varphi_{Z_{2M}} = \varphi_{I_{2M}} + 180^\circ + 70^\circ$$

因为负序电流 I_{2M} (对于 A 相接地故障)可以由三相测量电流如下式计算得到

$$\dot{I}_{2M} = (\dot{I}_A + \alpha^2 \cdot \dot{I}_B + \alpha \cdot \dot{I}_C) / 3$$

负序电压 V_{2M} 定义: $3 \cdot \dot{V}_{2M} = \dot{V}_A + \alpha^2 \cdot \dot{V}_B + \alpha \cdot \dot{V}_C$, 令中间变量 $\dot{V}_{sum} = \alpha^2 \cdot \dot{V}_B + \alpha \cdot \dot{V}_C$, 因为 B、C 两相的电压可以由带电指示器测量得到。又有 $FC=FB/CR$, 假设 FB 和 CR 皆为已知, 所以把这两相的电压写成指数形式:

$$\dot{V}_{sum} = \alpha^2 \cdot FB \cdot e^{j\varphi_B} + \alpha \cdot FC \cdot e^{j\varphi_C}$$

有 $3 \cdot \dot{V}_{2M} = \dot{V}_A + \dot{V}_{sum}$ 。

A 相电压的角度可由带电指示器测量得到。因此由矢量和的图解法可以得到: 如图 6 所示, 如果从 \dot{V}_{sum} 的末端, 沿着平行于 \dot{V}_A 的方向, 朝 \dot{V}_{2M} 所在直线作延长线, 与 \dot{V}_{2M} 所在直线截得的延长线长度就是 A 相电压的幅值 FA 。

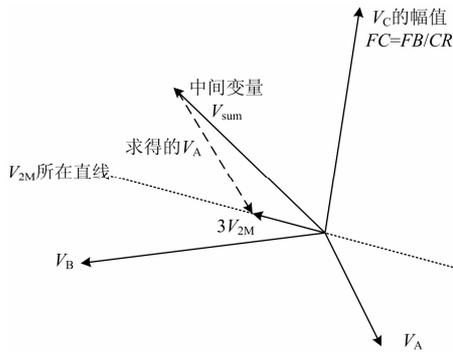


图 6 计算 A 相(故障相)电压的幅值

Fig. 6 Estimating the magnitude of V_A (faulted phase voltage)

把图 6 的作图过程用解析的形式表达, 便可以求得 A 相电压的实部和虚部分别为

$$\text{Re} V_a = \frac{-\text{Im}\{\dot{V}_{sum}\} + \tan(\varphi_{V_{2M}}) \cdot \text{Re}\{\dot{V}_{sum}\}}{\tan(\varphi_A) - \tan(\varphi_{V_{2M}})}$$

$$\text{Im} V_a = \text{Re} V_a \cdot \tan(\varphi_A)$$

至此, 三相电压的幅值和角度皆为已知, 残余电压的角度可以求得。

$$\varphi_{VR} = \arctan\left(\frac{\text{Im}V_a + \text{Im}V_b + \text{Im}V_c}{\text{Re}V_a + \text{Re}V_b + \text{Re}V_c}\right)$$

3.2.2 计算 DG 侧装置 D2 的残余电压角度

对处于 DG 侧的装置 D2, 由图 4 可得

$$V_{2N} = I_{2N} \cdot Z_{2N} = I_{2N} \cdot (Z_{2SN} + Z_{2LN})$$

装置背后的负序阻抗角 $\varphi_{Z_{2N}}$ 类似系统侧装置背后的负序阻抗角约等于 70° 。由此可以得到装置处的负序电压角度 V_{2N} 应该为

$$\varphi_{V_{2N_实际}} = \varphi_{I_{2N}} + \varphi_{Z_{2N}} = \varphi_{I_{2N}} + 70^\circ$$

但是, 由于装置并不能事先得知故障的方向, 所以只能统一使用当故障发生在正向的公式来计算:

$$\varphi_{V_{2N_假设}} = \varphi_{I_{2N}} + 70^\circ + 180^\circ$$

如图 7 所示, 因为作图的过程是从 \dot{V}_{sum} 的末端向 \dot{V}_{2N} 所在直线作延长线, 所以即使我们假设的 \dot{V}_{2N} 与真实方向相差 180° , 还是可以得到正确的 \dot{V}_A 幅值。求得 \dot{V}_A 幅值后, 残余电压角度相应可求。

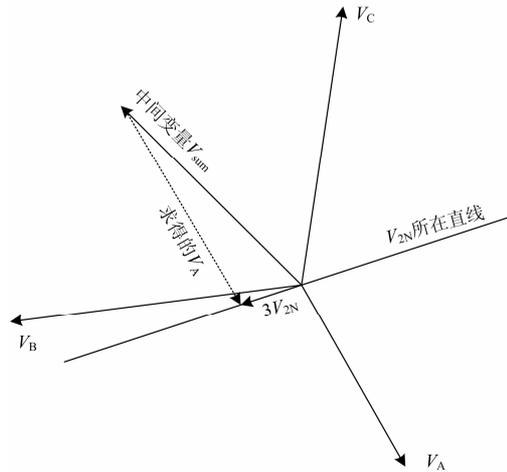


图 7 负序电压假设的和实际的角度相差 180° , 对实际求故障相电压幅值没有影响

Fig. 7 Shifting of negative sequence voltage for 180° has no impact for calculating the faulty phase voltage amplitude

3.2.3 计算负荷侧装置 D3 的残余电压角度

当装置安装在故障的负荷侧, 如图 8 中装置 D3 的相对于故障 F2 的位置, 对 D3 有

$$V_{2N} = I_{2N} \cdot Z_{2N}$$

式中, Z_{2N} 主要取决于负荷的阻抗角。假设负荷的功率因数为 0.9, 那么阻抗角为 $\arccos(0.9) = 25.8^\circ$ 。如果仍旧假设阻抗角为 70° , 会导致 40° 的误差。

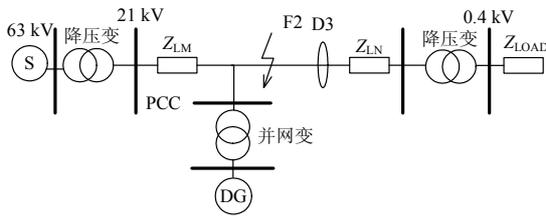


图 8 装置在故障的负荷侧

Fig. 8 Single-phase ground fault in phase A, device at load side of the fault

因为在中性点有效接地的系统中，单相接地故障产生的负序电压与相电压相比通常是一个很小的值，所以 $\dot{V}_{sum} = \alpha^2 \cdot \dot{V}_B + \alpha \cdot \dot{V}_C$ 与 V_A 接近 180° 反向。因此 40° 的偏差只会带来很小的误差，如图 9 中示出。

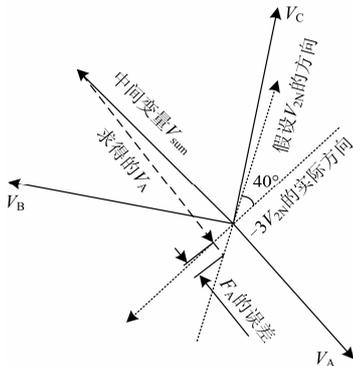


图 9 负荷侧装置的计算，负序电压角度 40° 误差对计算 A 相电压幅值造成误差的分析

Fig. 9 Estimated and actual direction of V_2 for device at load side of the fault

4 仿真验证

为了检验上述算法的精度，在 EMTP/ATP 中参照表 2 搭建了带有分布式发电的配电网，并用 Matlab 控制输入不同的参数组合，自动进行批量仿真和计算分析。

表 2 对不同的中性点接地方式组合采用不同 ANSI67N 的动作特性

Table 2 Combination of neutral grounding point and operation characteristic of ANSI67N

系统电源	分布式电源	ANSI67N	残余电压
中性点接地	并网变接地	动作特性	计算方法
有效	有效/非有效	方向角	方法 2
消弧线圈	不接地	有功电流/功率	方法 1
不接地	不接地	方向角/无功电流	方法 1

4.1 测试用例

为了覆盖所有的极端情况，选取的线路段长度

为 $1\sim 40$ km，并且考虑架空线和地下电缆的混合线路，单相接地故障的过渡阻抗从 $0.01\sim 300 \Omega$ ，考虑两种情况的中性点接地系统，测试用例的总数超过 20 000 个。

检测接地故障的判别标准是检测到的残余电流 RMS 值超过 1 A 的持续时间长于 100 ms。在判定故障方向时，同时采用从 EMTP/ATP 中的测量值计算得到的残余电流和采用本方法计算得到的残余电流，并将两个残余电压同时应用与 ANSI67N 保护故障检测与方向判定算法，设定合理的正向、反向和不动作区域。

4.2 结果分析

在仿真中，通过对比从 EMTP/ATP 直接测量的和经本方法计算得出的残余电压角度，误差集中在 $\pm 15^\circ$ 左右以内。

因为 ANSI67N 本身具有良好的容错性，所以当采用经本方法计算得出的残余电压角度时，虽然有一定的误差，最后的判定结果除了 4 个测试用例，其他 20 000 多个全部落在正确判定的动作区域内。

经过分析发现，这 4 个测试的角度误差并不大（均小于 15° ），但是全部发生在当中性点为消弧线圈接地，而方向判据采用有功电流特性时。当角度偏差为逆时针方向时，残余电流较大，例如为 55 A，因为有功电流正向动作区域门限值设定在 $+2$ A，所以比较小的残余电压角度误差也会导致有功部分越线而被判定错误，如图 10 所示。这个问题其实也是消弧线圈接地时固有的问题。

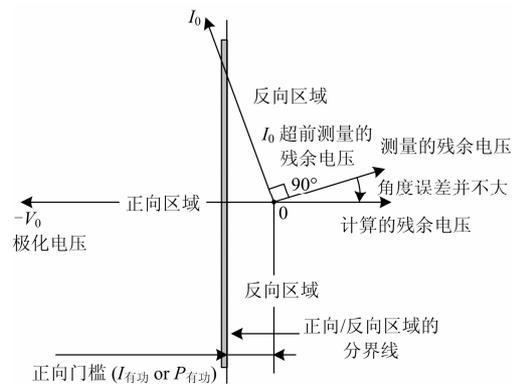


图 10 小的负方向残余电压角度计算误差可能会导致误判，在残余电流较大而有功门阈较低时

Fig. 10 Small negative error of VR angle will lead to error detection during high IR values

5 结论

本文介绍了一种适用于电流互感器配合带电指示器获得残余电压角度，进而实现单相接地故障定

位的方法。在单相接地故障时残余电流较小的系统中安装了分布式电源的导致故障两侧残余电流均比较大的系统中,单凭电流判据无法区分故障方向。相比在每一个故障指示器安装电压传感器,采用本方法可以用较低成本获得残余电压角度,从而实现故障定位。

参考文献

- [1] 齐郑, 乔丰, 黄哲洙, 等. 基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 34-39.
QI Zheng, QIAO Feng, HUANG Zhezhu, et al. Genetic algorithm fault location based on transient component for neutral point non-effective grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 34-39.
- [2] 陈煦斌, 秦立军. 配网故障指示器最优配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 100-104.
CHEN Xubin, QIN Lijun. Optimal configuration of fault indicator in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 100-104.
- [3] 高艺文, 刘俊勇, 雷成, 等. 考虑配电网结构变化的DG规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 40-46.
GAO Yiwen, LIU Junyong, LEI Cheng, et al. DG planning considering the variation of the distribution network structure[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 40-46.
- [4] 宋洪磊, 吴俊勇, 吴林峰. 电力系统紧急情况下的动态分区和自主解列策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 224-230.
SONG Honglei, WU Junyong, WU Linfeng. Dynamic partitioning and active-split strategy in power system emergency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 224-230.
- [5] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 85-89.
YAO Yong, ZHU Guiping, LIU Xiucheng. Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 85-89.
- [6] 张明锐, 刘金辉, 金鑫. 应用于智能微网的SVPWM固态变压器研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 90-97.
ZHANG Mingrui, LIU Jinhui, JIN Xin. Research on the SVPWM solid state transformer applied in smart micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 90-97.
- [7] 刘万顺, 黄少峰, 徐玉琴. 电力系统故障分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [8] 普瑞夫. 电网保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-08-09

作者简介:

李 容(1980-), 男, 通信作者, 工学硕士, 工程师, 从事继电保护产品研发工作; E-mail: rong-ka.li@schneider-electric.com

任 睿(1984-), 男, 工学学士, 工程师, 从事继电保护产品研发工作;

宋聚忠(1966-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事发电机保护方面的研究工作。

(编辑 魏小丽)