DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.018

基于傅立叶算法实现的小接地电流系统单相接地故障选线研究

黄其新，杨正理，陆朱卫

（三江学院 机械与电气工程学院，江苏 南京 210012）

摘要：针对最大$\Delta(I\sin\varphi)$算法在计算过程中需要引入一个中间参考正弦信号，可靠性低且计算量较大的问题,引入了傅立叶算法实现最大$\Delta(I\sin\varphi)$小接地电流系统故障选线，采用该方法对中性点不接地系统进行分析，避免了多次求取电压和电流的相位过程，减少了投影和乘法运算次数，提高了运算速度，对于中性点经消弧线圈接地系统，在系统发生单相接地故障的暂态过程中，该方法同样有效。算例中设计了 10 kV 不接地系统，采用 ATP-EMTP 软件进行仿真，对故障在线路和母线上时进行故障线路选择。研究结果表明：该算法能更加可靠、快速地实现选线功能。

关键词：小接地电流系统；单相接地故障；傅立叶算法；故障选线

中图分类号：TM74 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-4551(2017)10-1180-06

Faulty line selection for single-phase ground short circuits in non-direct earth neutral systems based on fourier algorithm

HUANG Qi-xin, YANG Zheng-li, LU Zhu-wei

(Mechanical and Electrical Engineering School, Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

Abstract: Aiming at the shortages of maximizing $\Delta(I\sin\varphi)$ which required an intermediate referenced sine signal decreasing the algorithm's reliability and its computation process became more complicated, Fourier algorithm based-on maximizing $\Delta(I\sin\varphi)$ principle was proposed in this paper, which was applied to neutral non-direct earth neutral systems as an example for analysis. This algorithm improved the reliability of problem solving and extremely simplifies the computation complexity of the original algorithm by avoiding computing phase angle between voltage and current. Based on the neutral non-grounded system as an example for analysis, it is effective in single-phase earth fault transient process in arc suppression coil grounded system. The simulation was conducted by ATP-EMTP in 10 kV neutral non-grounded system to choose the fault line when it was on lines and buses. The results prove that the algorithm is faster and more reliable to the faulty line selection.

Key words: non-direct earth neutral systems; single-phase ground short circuits; Fourier algorithm; faulty line selection

0 引 言

我国中低压配电网主要采用小接地电流系统，且多以架空线路为主，这种系统发生单相接地故障占到电网故障总数的 80%以上。由于发生故障时流过保护安装处的零序电流由电路分布电容产生，数值较小，且难免受到电流互感器 CT 所产生的不平衡电流的影响，因而传统的基于零序电流所构成的继电保护装置难以在小接地电流系统中实现可靠、灵敏的故障选线功能。这种电网仍然广泛采用绝缘检测装置实现单相接地故障的检测，但这种装置没有自动定位故障线路的功能，还需要通过人工巡线的方法来确定故障位置，不仅耗费大量的人力、物力，而且短时断电还给用户造成较大的经济损失，同时不利于人身、设备的安全[1-4]。因此，如何对

收稿日期：2016-07-12

作者简介：黄其新（1980–），女，湖北潜江人，讲师，主要从事电力运行与控制方面的研究。E-mail: hqx_qx@126.com

小接地电流系统发生单相接地时进行故障选线成为研究的热点。

基于最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理的故障选线方法是于 1995 年提出的，经过多年改进，已经被成功应用于多种型号的微机保护装置中。这种方法能完全克服由 CT 产生的不平衡电流对电流电容的影响，使故障选线的可靠性、灵敏性及适用范围得到很大的提高[5]。现场统计数据也表明，这种算法的故障选线效果良好。但这种算法需要额外地引入一个中间参考电压信号，使这种算法的可靠性有所降低；且该算法在应用中需要多次求取电压和电流的相位，需要通过多次乘法运算来计算故障前、后零序电流的投影，因而算法的运算量较大[6]。

针对上述缺点，本文提出采用傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理故障选线，避免引入中间参考正弦电压信号，简化原算法的计算量，使得这种故障选线方法得到较大改进，更快速、可靠地实现选线功能。

1　最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理故障选线

中性点不接地电网发生单相接故障时，全电网都会出现零序电压 $3\dot{U}_0$，其大小等于电源的相电动势。当母线有多条出线时，流过故障线路保护安装处的零序电流 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 的大小等于其它所有非故障线路上电容电流之和，其方向滞后 $3\dot{U}_0$ 90°；而流过非故障线路（包括变压器进线）保护安装处的零序电流 $3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}$ 为本线路非故障相的电容电流之和，其方向超前 $3\dot{U}_0$ 90°。上述零序电压及零序电流的相位关系如图 1 所示。

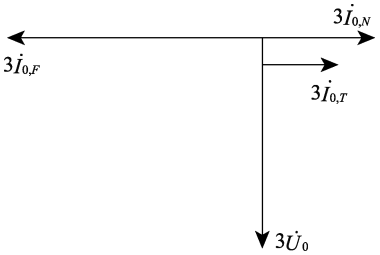


图 1　单相接地故障相量图

图中，$3\dot{I}_{0,\mathrm{T}}$ 为变压器进线的零序电流，它与故障选线的判据无关，不予考虑。理想情况下，由于电网发生故障后 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 及 $3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}$ 大小及方向均不同，因而可以基于这两个特征构成相应的零序电流或零序功率方向保护实现故障选线功能。然而，在架空线路电网中，$3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 及 $3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}$ 均来自允许有误差的 CT，CT 的不平衡电流必然给 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 及 $3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}$ 的正确检测造成影响。如果设故障线路、非故障线路的 CT 所产生的不平衡电流分别记为 $\dot{I}_{\mathrm{bp,F}}$、$\dot{I}_{\mathrm{bp,N}}$。最恶劣的情况下，当 $\dot{I}_{\mathrm{bp,F}}$ 较大，且其方向与 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 正好反相；而 $\dot{I}_{\mathrm{bp,N}}$ 较小，且其方向与 $3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}$ 同相时，就会产生的情况如图 2 所示。

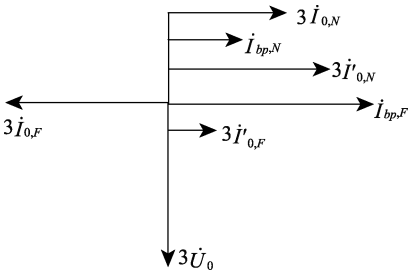


图 2　考虑不平衡电流时的相量图

此时，$3\dot{I}'_{0,\mathrm{F}}(=3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}+\dot{I}_{\mathrm{bp,F}})$ 与 $3\dot{I}'_{0,\mathrm{N}}(=3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}+\dot{I}_{\mathrm{bp,N}})$ 方向相同，且幅值 $3I'_{0,\mathrm{N}}$ 大于 $3I'_{0,\mathrm{F}}$。如果仍采用基于零序电流的大小及方向为判据进行故障选线，必然会造成错误的结果。实际上，由于系统大小不一，母线上的各条出线长短有异，线路负荷大小不同，且 CT 的误差大小也不完全一致，这种情况在现场是完全有可能出现的，必须进行考虑。

现场经常遇到的实际情况如图（3~5）所示。

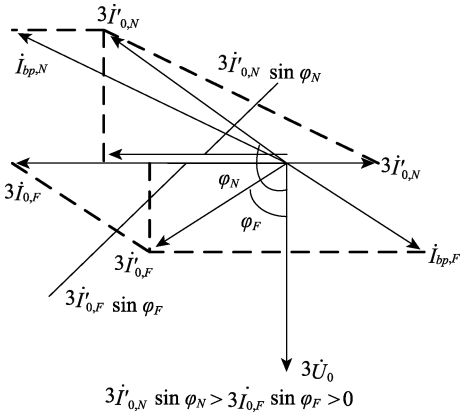


图 3　不能正确判断的部分情况 1

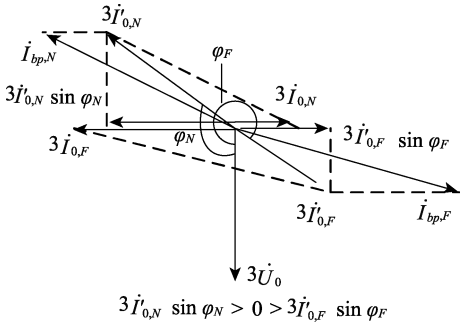


图 4　不能正确判断的部分情况 2

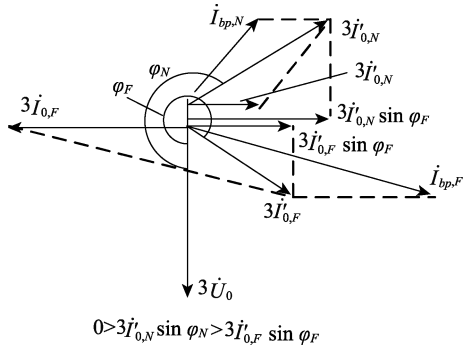


图 5 不能正确判断的部分情况 3

在这些情况下，依据电流的大小及方向进行故障选线均不能进行正确判断。图中将 $3\dot{I}'_{0,\mathrm{F}}$ 与 $3\dot{I}'_{0,\mathrm{N}}$ 投影到 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 的理论方向（即滞后 $3\dot{U}_0$ 90°的方向)上再进行比较，这种投影方法也是本文后面将要用到的投影方法。

为了解决上述问题，首先分析系统发生故障后零序电流的分布情况：若定义 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 为正方向，则故障发生后在 CT 的不平衡电流 $\dot{I}_{\mathrm{bp,F}}$ 上增加了一个 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 形成了 $3\dot{I}'_{0,\mathrm{F}}$；在 CT 的不平衡电流 $\dot{I}_{\mathrm{bp,N}}$ 上增加了一个 $3\dot{I}_{0,\mathrm{N}}$ 形成了 $3I'_{0,\mathrm{N}}$。

如果将故障前、后的零序电流都投影到 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 的理论方向，然后再对投影值求其差值，就能消除不平衡电流的影响。基于这个原理，给出如下基于最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理的故障选线方法：通过一个中间参考正弦信号，该正弦信号来自电压互感器（potential transformer，PT）线电压或变电所用交流电源信号，使得各线路故障前的零序电流 $3\dot{I}_{0,i}$（此时只有 $\dot{I}_{\mathrm{bp}}$）对故障母线段 h 故障后的 $3\dot{U}_{0,\mathrm{h}}$ 也能找到相位关系，由此再将所有线路故障前、后的零序电流 $3\dot{I}'_{0,i前}$ 和 $3\dot{I}'_{0,i后}$ 都投影到 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 方向。接着，计算出各线路故障前、后的投影值之差 $\Delta I_{0,i}$，找出此最大的差值 $\Delta I_{0,k}$，即最大 $\Delta(I\sin\varphi)$。显然，当 $\Delta I_{0,k}\geqslant 0$ 时，对应的线路 k 为故障线路；否则为 h 段母线发生故障。

但该算法在实现过程中有两个重要缺点。一是算法需要额外引入一个中间参考正弦信号，如果该信号出现异常，比如 PT 二次侧出现断线，或所用交流电失压，则该算法就无法继续实现；二是该算法计算过程中需要多次求取电压和电流的相位关系，并进行相量投影，则需进行多次乘法运算，这就使该算法的计算量相当大。这种算法出现上述缺点的原因在于：一是故障前电网中没有零序电压，所以需要引入一个稳定的中间参考信号，实现将故障前线路检测到的零序电流投影到中间参考正弦信号顺时针旋转 90° 的方向上（即故障后故障线路零序电流所在方向）；二是将故障前、后线路检测到的零序电流均投影到故障后故障线路零序电流所在方向，然后求投影值之差，多次投影必然造成运算量增加。如果能够引入一种方法，避免引入中间参考正弦向量，且使投影的次数减少，能够提高算法的可靠性，并且能减少计算量，提高算法的运算速度。本文所提出的采用傅立叶算法来实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理的故障选线，就能达到这一目的。

2 傅立叶算法

设有电压信号 $u(t)=\sqrt{2}U\sin(\omega t+\varphi_U)$，其傅里叶级数形式为：

$$u(t)=\sum_{n=0}^{\infty}(b_n\cos n\omega t+a_n\sin n\omega t) \tag{1}$$

式中：a_n，b_n—各次谐波的正弦量和余弦量的振幅，$n=0,1,2\cdots$；a，b—基波分量的正弦量和余弦量的振幅；ω—角频率，$\omega=2\pi f$。

根据傅立叶级数原理，a、b 分别为:

$$a=\frac{2}{T}\int_0^T u(t)\sin\omega t\mathrm{d}t\quad b=\frac{2}{T}\int_0^T u(t)\cos\omega t\mathrm{d}t \tag{2}$$

于是，基波分量可表示为：

$$u(t)=b\cos\omega t+a\sin\omega t \tag{3}$$

将电压信号 $u(t)$ 用三角公式展开，可得：

$$u(t)=\sqrt{2}U\sin\omega t\cos\varphi_U+\sqrt{2}U\cos\omega t\sin\varphi_U \tag{4}$$

比较式（3~4）可得：

$$a=\sqrt{2}U\cos\varphi_U\quad b=\sqrt{2}U\sin\varphi_U \tag{5}$$

由式（5）可求出电压信号的有效值和相角，$2U^2=a^2+b^2$，$\varphi_U=\arctan(b/a)$。在用微机计算 a、b 时，采用有限项方法求得。假设输入信号为 $x(t)$，采样周期为 T_s，每个基波周期内采样点数记为 N，则：

$$\begin{aligned}a&=\frac{1}{N}\left[2\sum_{k=1}^{N}x(k)\sin k\frac{2\pi}{N}\right]\\ b&=\frac{1}{N}\left[x(0)+2\sum_{k=1}^{N-1}x(k)\cos k\frac{2\pi}{N}+x(N)\right]\end{aligned} \tag{6}$$

注意到，当确定了电压信号 $u(t)$ 的坐标原点后，由于 $u(t)$ 为标准的周期信号，所以在任何采样时间下，a、b 的值是相等的，而由此计算得到的相位（等价于 b/a）也不变。而信号的相位总是相对于某一坐标原点来定义的。因此，对于处于同一坐标中的不同信号而言，由不同时刻采样值得到的相位值具有绝对可比性。这就是本研究采用傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理进行故障选线的主要依据。

同理，设有电流信号 $i(t)=\sqrt{2}I\sin(\omega t+\varphi_I)$，用 c、d 表示 $i(t)$ 傅里叶级数展开式中基波分量的正弦量和余弦量的振幅。同上面的分析过程，也可以得到：

$$c=\sqrt{2}I\cos\varphi_I \quad d=\sqrt{2}I\sin\varphi_I \tag{7}$$

电压和电流的相位差：

$$\Delta\varphi=\varphi_U-\varphi_I=\arctan(\frac{b}{a})-\arctan(\frac{d}{c}) \tag{8}$$

如果将上述的电压信号 $u(t)$ 、电流信号 $i(t)$ 变换为相量，并写成复数形式，将式（5~7）代入其中，有：

$$\dot{U}=U\cos\varphi_U+\mathrm{j}U\sin\varphi_U=\frac{\sqrt{2}}{2}(a+\mathrm{j}b) \tag{9}$$

$$\dot{I}=I\cos\varphi_I+\mathrm{j}I\sin\varphi_I=\frac{\sqrt{2}}{2}(c+\mathrm{j}d) \tag{10}$$

3　傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理故障选线基本原理

设 u_3 、 u_4 为系统发生单相接地故障后母线零序电压 $3U_0$ 采用式（6）计算得到的正弦量和余弦量振幅值；i_1 、 i_2 与 i_3 、 i_4 分别为系统发生单相接地故障前、后该母线上某条出线零序电流 $3I_0$ 采用式（6）计算得到的正弦量和余弦量振幅值；并记故障前、后出线的零序电流分别为 $3\dot{I}_{0,B}$ 和 $3\dot{I}_{0,A}$，根据式（9~10）有：

$$3\dot{U}_0=\frac{\sqrt{2}}{2}(u_3+\mathrm{j}u_4) \tag{11}$$

$$3\dot{I}_{0,\mathrm{B}}=\frac{\sqrt{2}}{2}(i_i+\mathrm{j}i_2) \tag{12}$$

$$3\dot{I}_{0,\mathrm{A}}=\frac{\sqrt{2}}{2}(i_3+\mathrm{j}i_4) \tag{13}$$

设 $3\dot{U}_0'$ 为将 $3\dot{U}_0$ 顺时针旋转 90° 所得的相量，该方向为图 1 中 $3\dot{I}_{0,F}$ 的理论方向，即滞后 $3\dot{U}_0$ 90° 的方向，得相量：

$$3\dot{U}_0'=-\mathrm{j}3\dot{U}_0'=\frac{\sqrt{2}}{2}(u_4-\mathrm{j}u_3) \tag{14}$$

则故障前、后零序电流在 $3\dot{I}_{0,F}$ 方向上的投影 $(I\sinh)_B$ 、 $(I\sinh)_A$ 可用相量点积公式求得，即：

$$\begin{aligned}(I\sinh)_B&=\frac{3\dot{I}_{0,B}\cdot 3\dot{U}_0'}{3U_0}\\(I\sinh)_A&=\frac{3\dot{I}_{0,A}\cdot 3\dot{U}_0'}{3U_0}\end{aligned} \tag{15}$$

式中：$3U_0$ —母线零序电压的有效值。

而故障后、前零序电流在 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 方向上的投影 $(I\sinh)_A$ 、$(I\sinh)_B$ 的差 $\Delta(I\sinh)$ 根据式（12）可表示为：

$$\Delta(I\sinh)=(I\sinh)_A-(I\sinh)_B=(3\dot{I}_{0,A}-3\dot{I}_{0,B})\cdot\frac{3\dot{U}_0'}{3U_0} \tag{16}$$

将式（8～10）代入式（13）可得：

$$\begin{aligned}\Delta(I\sinh)=&\left\{\frac{\sqrt{2}}{2}[(i_3-i_1)+\mathrm{j}(i_4-i_2)]\right\}\times\\&\frac{1}{3U_0}[\frac{\sqrt{2}}{2}(u_4-ju_3)]=\\&\frac{(i_3-i_1)u_4-(i_4-i_2)u_3}{2}*3U_0\end{aligned} \tag{17}$$

即要求取故障后、前零序电流在 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 理论方向上的投影的差等于故障后、前零序电流的差在 $3\dot{I}_{0,\mathrm{F}}$ 理论方向上的投影。

要说明的是，上面的分析过程是针对中性点不接地系统进行的。当中性点采用消弧线圈接地并发生单相接地故障时，零序电流的分布特征会发生变化（是指故障进入稳态阶段）。但是，在故障的暂态过程中消弧线圈中的电流不能发生突变，且消弧线圈对高频信号具有较大的阻抗，因此在系统发生单相接地故障的暂态过程中，完全可以忽略消弧线圈的影响，而将经消弧线圈接地的系统当作中性点不接地系统处理[7-9]。这样，上述的分析过程同样适用于中性点经消弧线圈接地系统[10]。

在大、中型变电所内往往有多个电压等级以及多条母线，微机保护装置可以设计成对同一个变电所内的多个电压等级、多条母线以及多条出线进行同时检测，并可进行灵活的扩展。为说明方便，仍以单条母线 4 条出线为例进行说明傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 方法进行故障选线的过程如下：

（1）首先对系统母线的零序电压 $3\dot{U}_0$ 及各条出线的零序电流 $3\dot{I}_{0,i}$（$i=1,2,3,4$，下同）进行采样，并保留各条出线在当前采样时刻前最少一个周波内的零序电流采样数据，以备采用傅立叶算法计算所需的电气量参数；

（2）采用傅立叶算法计算零序电压 $3\dot{U}_0$ 的有效值 $3U_0$，当 $3U_0>15$ V（15 V 为绝缘检测装置的整定值）时，判定为系统发生了单相接地故障，立即发出声光报警信息。并立刻对发生故障后各出线的零序电流进行采样，得到最少一个周期的采样序列，并按前面所述方法计算系统故障前、后该各条出线零序电流的正弦量和余弦量振幅值；

（3）计算各条出线故障后、前的零序电流 $3\dot{I}_{0,A}$ 和 $3\dot{I}_{0,B}$ 的相量差 $\Delta\dot{I}_{0,i}$：

$$\Delta\dot{I}_{0,i}=3\dot{I}_{0,A,i}-3\dot{I}_{0,B,i} \tag{18}$$

（4）求各相量差 $\Delta\dot{I}_{0,i}$ 在 $3\dot{I}_{0,F}$ 的理论方向上的投影 $\Delta(\dot{I}_{0,i}\sinh)$，即：

$$\Delta(\dot{I}_{0,i}\sinh)=\frac{\Delta\dot{I}_{0,i}\cdot 3\dot{U}_0'}{3U_0} \tag{19}$$

（5）计算 $\Delta I_{0,k}=\max\{\Delta(\dot{I}_{0,i}\sinh),i=1,2,3,4\}$，当 $\Delta I_{0,k}>I_{\mathrm{set}}$（$I_{set}$ 为整定值，根据系统大小、出线特点进行实际

整定，其目的是为了提高微机保护动作的可靠性）时，判第 k 条出线故障；当 $\Delta I_{0,k} \leqslant 0$ 时，判母线故障。

傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理故障选线与原算法相比，具有以下主要优点：

（1）避免了引入中间参考正弦电压信号，提高了新算法的可靠性；

（2）傅立叶算法避免了原算法中多次求取电压和电流的相位，使新方法的计算量减少；

（3）原算法中通过计算故障前、后零序电流在 $3\dot{I}_{0,F}$ 理论方向上的投影，再求投影后的差值；而傅立叶算法由于使不同信号的相位关系具有绝对可比性，因而可以通过先求取零序电流的差值，再求差值在 $3\dot{I}_{0,F}$ 理论方向上的投影也能得到同样的结果，使新方法的计算量减少；

（4）傅立叶算法不需要再求取零序电流的有效值，使新方法的计算量减少；

（5）计算 $\Delta(\dot{I}_{0,i}\sinh)$ 过程中，根据式（17），需要除以 $2*3U_0$。由于各 $2*3U_0$ 大小相等，所以可不进行运算，同样能实现 $\Delta(\dot{I}_{0,i}\sinh)$ 大小的比较。

傅立叶方法故障选线流程图如图 6 所示。

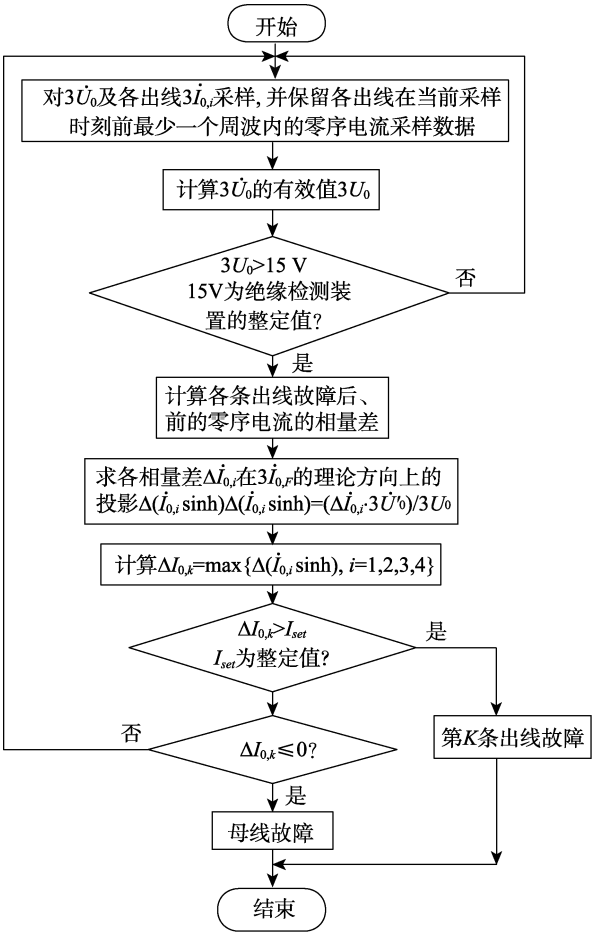


图 6　傅立叶方法故障选线流程图

4　算例验证及分析

本文采用 ATP-EMTP 软件进行仿真实验，建立一个 10 kV 中性点不接地系统的仿真模型，如图 7 所示。

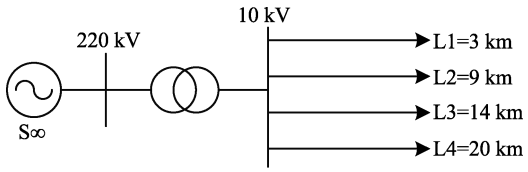


图 7　小接地电流系统单相接地故障网络图

电源为无穷大功率电源，变压器电抗 $Z_T = 0.507\,9 + \mathrm{j}0.330\,5\ \Omega$，负荷共有 4 条 10 kV 输电线路，实际应用中，10 kV 输电线路的输电距离一般为 6 km～20 km，为使仿真时的故障特征更加明显，这里设置了线路的长度分别为：3 km，9 km，14 km，20 km，线路的正序参数和零序参数分别为：$R_1 = 0.223\,\Omega/\mathrm{km}$，$L_1 = 0.944\,5\ \mathrm{mH/km}$，$C_1 = 0.056\,9\ \mu\mathrm{F/km}$，$R_0 = 0.440\,5\ \Omega/\mathrm{km}$，$L_0 = 4.115\,8\ \mathrm{mH/km}$，$C_1 = 0.035\,3\ \mu\mathrm{F/km}$，采样频率为 50 kHz，仿真了线路 1 和母线在不同的故障角时发生单相接地故障时的结果，如表（1~3）所示。

表 1　不同故障角下线路故障选线结果

故障角	$\Delta I_{0,k}$				I_{set}	选线结果
	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$		
0°	28.92	22.33	18.74	15.6	25.6	线路 1
60°	16.54	15.42	12.86	10.74	15.9	线路 1
90°	32.82	28.94	24.38	19.16	29.3	线路 1

表 2　不同故障角下母线故障选线结果

故障角	$\Delta I_{0,k}$				选线结果
	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	
0°	–10.92	–6.33	–4.74	–1.6	母线
60°	–32.41	–23.26	–5.66	–3.43	母线
90°	–52.43	–30.63	–6.87	–3.58	母线

表 3　改进前后的计算次数对比结果

故障角	计算次数	
	优化前	优化后
0°	32 589	13 652
60°	37 674	15 337
90°	42 903	11 085

从上面的结果可以看出：在不同的故障角下，该方法可以正确选出故障线路，不受故障角度的影响，且采用傅立叶算法能大大减少运算次数，节约计算时间。

5　结束语

采用傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理故障选线功能，一方面避免了原算法中引入的中间参考正弦电压信号，提高了算法的可靠性；另一方面采用傅立叶算法可以较大程度地减少原算法的计算量，提高了微机保护装置的快速性。所以，采用傅立叶算法实现最大 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理故障选线更加简单、可靠，是现有的小接地电流系统中进行故障选线方法中比较成功、有效的新算法。这种算法已在多种型号的微机保护装置（如 WXH-82X 型线路微机保护）中成功应用，根据现场运行数据，该算法的选线正确率高，是一种比较理想的算法。

参考文献(References):

[1] 康小宁, 刘　鑫, 索南加乐, 等. 基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 88-93.

[2] 简金宝, 王媛媛, 曾祥君, 等. 基于系统聚类分析的馈线接地保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 111-115.

[3] 薛永端, 李天友, 李伟新, 等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 101-106.

[4] 张海申, 何正友, 张　钧. 谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 79-83.

[5] 檀国彪, 涂东明, 陈大鹏. 基于最大 $I\sin\varphi$ 或 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理的微机选线装置[J]. 中国电力, 1995, 25(7): 16-20.

[6] 张立华, 徐文立. 小接地电流系统单相接地故障选线的一种算法[J]. 清华大学学报：自然科学版, 1998, 35(9): 74-76.

[7] 杨琳霞, 刘　丹. 基于小波理论的暂态量故障选线研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(8): 41-44.

[8] 吴乐鹏, 黄　纯.基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.

[9] 薛永端, 徐丙银, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.

[10] 束洪春, 彭仕欣, 李　斌, 等. 利用测后模拟的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 59-64.

[**编辑**：张　豪]

本文引用格式：

黄其新，杨正理，陆朱卫. 基于傅立叶算法实现的小接地电流系统单相接地故障选线研究[J]. 机电工程，2017，34(10)：1180–1185.

HUANG Qi-xin, YANG Zheng-li, LU Zhu-wei. Faulty line selection for single-phase ground short circuits in non-direct earth neutral systems based on fourier algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1180–1185.　　《机电工程》杂志：http://www.meem.com.cn

（上接第 1172 页）

[5] HARNEFORS L. Globally stable speed-adaptive observers for sensorless induction motor pdrives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2007, 54(2): 1243-1245.

[6] HARNEFORS L. Instability phenomena and remedies in sensorless indirect field oriented control[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2000, 15(4): 733-743.

[7] HINKKANEN M, HARNEFORS L, LUOMI J. Reduced-order flux observers with stator-resistance adaptation for speed- sensorless induction motor drives[J]. **Power Electronics IEEE Transactions on**, 2010, 25(5): 1173-1183.

[8] SCHAUDER C. Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1992, 28(5): 1054- 1061.

[9] ORLOWSKA K T, DYBKOWSKI M. Stator-current- based mras estimator for a wide range speed-sensorless induction-motor drive[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2010, 57(4): 1296-1308.

[10] 尾形克彦，著. 国外计算机科学教材系列: 现代控制工程[M]. 卢伯英, 佟明安，译.第 5 版.北京：电子工业出版社, 2011.

[11] JUNG H S, HWANG S H, KIM J M, et al. Diminution of current-measurement error for vector-controlled AC motor drives[J]. **IEEE transactions on Industry applications**, 2006, 42(5): 1249-1256.

[12] PELLEGRINO G, GUGLIELMI P, ARMANDO E, et al. Self-commissioning algorithm for inverter nonlinearity compensation in sensorless induction motor drives[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2010, 46(4): 1416-1424.

[**编辑**：张　豪]