

DOI: 10.7667/PSPC170139

采用差分滤波算法改进最大投影差值故障选线

杨正理, 黄其新, 王长鹏, 王欣

(三江学院, 江苏 南京 210012)

摘要: 为了提高最大投影差值($\Delta(I \sin \varphi)$)方法在故障选线中的可靠性和运算速度, 在分析了最大投影差值方法和差分滤波算法的原理后, 提出了采用差分滤波算法改进最大投影差值进行故障选线的新方法。利用差分滤波算法对最大投影差值方法进行优化, 优化后算法避免了引入中间参考正弦信号并减少了乘法运算量, 可靠性和运算速度都得到了提高。理论分析和大量仿真结果表明, 新算法不受故障角、过渡电阻、故障位置和电弧接地等参数的影响, 故障选线正确率能达到 100%。

关键词: 小电流接地系统; 差分滤波算法; 最大投影差值优化; 单相接地故障; 故障选线

A new fault line selection method of the maximizing shadow difference optimized by differential filter algorithm

YANG Zhengli, HUANG Qixin, WANG Changpeng, WANG Xin
(Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

Abstract: In order to improve the reliability and calculating speed of the maximizing shadow difference ($\Delta(I \sin \varphi)$) method in fault line selection, the principles of the maximizing shadow difference method and the differential filter algorithm are analyzed in detail, and a new fault line selection method of the maximizing shadow difference optimized by differential filter algorithm is proposed. The maximizing shadow difference method is optimized by differential filter algorithm. The optimized method avoids the intermediate referenced sine signal and reduces the multiplication calculation, which improves both the reliability and calculating speed. Theoretical analysis and simulation results show that the new method is immune to the parameters, such as the fault angle, transition resistance, fault distance, fault arc, and so on. The fault line selection accuracy rate can reach to 100%.

This work is supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Universities (No. 15KJD510006).

Key words: networks with un-ground neutral; differential filter algorithm; the maximizing shadow difference optimized; single-phase ground fault; fault line selection

0 引言

我国小电流接地系统中进行故障选线的方法很多^[1-6], 最大投影差值($\Delta(I \sin \varphi)$)方法因其能够在架空/电缆出线的有/无消弧线圈的各种电力系统中应用^[7], 能够克服电流互感器(Current Transformer, CT)不平衡电流所产生的不利影响, 具有灵敏性高和应用范围广的优势, 因而在各种类型的微机继电保护装置中得到广泛应用。但是, 最大 $\Delta(I \sin \varphi)$ 法具有两个较大缺点: 1) 该方法需要从电压互感器(Potential Transformer, PT)二次侧引入一个正弦电压

作为参考信号, 当变电所所用交流电失压或 PT 二次侧发生断线时, 参考信号丢失, 该方法不能正常实现, 可靠性降低; 2) 需要对电压和电流的相位差进行多次求取, 并需要对信号进行多次投影处理, 这就引入了较多的乘法运算, 使该方法的运算量加大, 延迟时间增长。

针对上述缺点, 在分析了最大投影差值方法和差分滤波算法的原理后, 提出了采用差分滤波算法改进最大投影差值进行故障选线的新方法。一方面不再需要从 PT 二次侧引入正弦电压信号, 较大程度地提高新方法的可靠性; 另一方面, 新方法减少了求取电压和电流相位差的次数, 并避免了多次对信号进行投影的过程, 使新方法的乘法运算量减少,

基金项目: 江苏高校自然科学研究面上项目(15KJD510006)

降低了延迟时间。因此, 改进后的最大投影差值方法能够更加可靠和快速地进行故障选线。

1 最大投影差值故障选线实现原理

设某中性点不接地电网由单条母线和多条出线构成, 发生单相接地故障时的故障特征如下:

- 1) 全系统都会出现零序电压 $3\dot{U}_0$, 数值等于系统电源的相电动势^[8-11];
- 2) 非故障线路(包括联接母线的变压器进线)上有零序电流 $3\dot{I}_{0,N}$, 其方向为由母线流向线路, 数值等于本条线路的对地电容电流之和;
- 3) 故障线路上有零序电流 $3\dot{I}_{0,F}$, 其方向为由线路流向母线, 数值等于所有非故障线路的对地电容电流之和^[12-14], $3\dot{I}_{0,F}$ 在数值上一般大于 $3\dot{I}_{0,N}$ 。

系统中所出现的零序电压和零序电流的相位关系如图 1 所示。图 1 中, $3\dot{I}_{0,T}$ 表示流过变压器进线的对地电容电流, 它在故障选线过程中不起作用, 所以下面分析过程中不再讨论。从图 1 可以明显看出, 在单条母线和多条出线所构成的中性点不接地系统中, $3\dot{I}_{0,N}$ 和 $3\dot{I}_{0,F}$ 在数值和方向上均有明显区别, 所以可以将 $3\dot{I}_{0,N}$ 和 $3\dot{I}_{0,F}$ 作为特征量, 基于其数值大小构成零序电流或者基于其方向构成零序功率方向的故障选线方法^[15-17]。

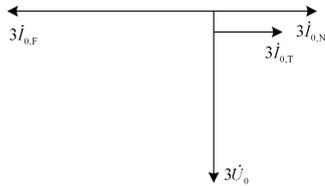


图 1 零序电压及零序电流的相位关系

Fig. 1 Phase relationship between zero-sequence voltage and zero-sequence current

而在实际的架空线路电网中, 由于零序电流 $3\dot{I}_{0,F}$ 和 $3\dot{I}_{0,N}$ 值较小, 且均来自允许有误差的 CT, 所以 CT 的不平衡电流对 $3\dot{I}_{0,F}$ 和 $3\dot{I}_{0,N}$ 的值将产生较大的影响。在最恶劣的情况下, 设非故障线路和故障线路上 CT 的不平衡电流分别为 $\dot{i}_{bp,N}$ 和 $\dot{i}_{bp,F}$, 当 $\dot{i}_{bp,N}$ 值较小, 方向与 $3\dot{I}_{0,N}$ 相同, 此时 $3\dot{I}'_{0,N} = 3\dot{I}_{0,N} + \dot{i}_{bp,N}$; 当 $\dot{i}_{bp,F}$ 值较大, 方向与 $3\dot{I}_{0,F}$ 相反, 此时 $3\dot{I}'_{0,F} = 3\dot{I}_{0,F} + \dot{i}_{bp,F}$ 。图 2 表示了考虑 CT 不平衡电流时的不利情况。如果不考虑 CT 不平衡电流对各条线路零序电流的影响, 直接基于 $3\dot{I}_{0,F}$ 和 $3\dot{I}_{0,N}$ 的大小和方向作为故障选线的依据, 必然会得到错误的结

果。在实际电网中, 由于母线上出线条数和各条出线的长短不一致, 各条线路所选 CT 测量误差和所带负荷大小不同, 上述的不利情况是完全可能发生的。如图 3(a)—图 3(c)所示, 就是现场遇到的 3 种 $3\dot{I}'_{0,N}$ 的幅值大于 $3\dot{I}'_{0,F}$ 、方向相同、基于零序电流大小和方向不能进行正常故障选线的实际情况。

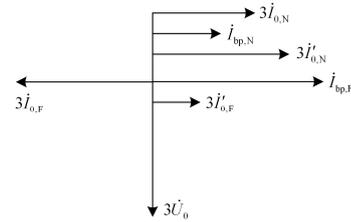


图 2 考虑不平衡电流时的相量图

Fig. 2 Phasor diagram of the unbalanced current

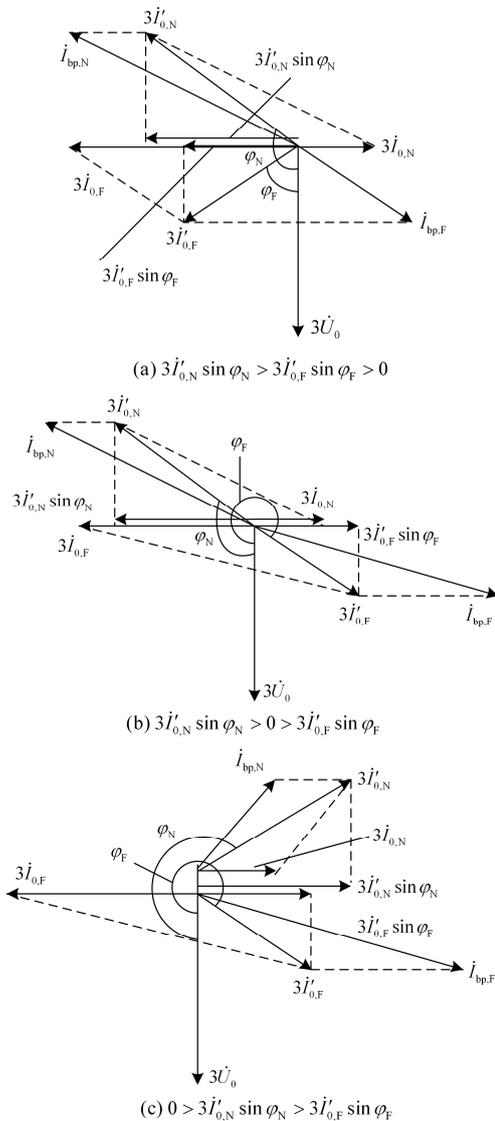


图 3 不能正确判断的部分情况

Fig. 3 Some situations that cannot be judged correctly

由图3可以看出,发生故障后非故障线路的零序电流 $3\dot{I}'_{0,N} = 3\dot{I}_{0,N} + \dot{I}_{bp,N}$, 即非故障线路零序电流 $3\dot{I}_{0,N}$ 和该线路的上 CT 不平衡电流 $\dot{I}_{bp,N}$ 的相量和; 发生故障后故障线路零序电流 $3\dot{I}'_{0,F} = 3\dot{I}_{0,F} + \dot{I}_{bp,F}$, 即故障线路零序电流 $3\dot{I}_{0,F}$ 和该线路上 CT 不平衡电流 $\dot{I}_{bp,F}$ 的相量和; 如果以 $3\dot{I}'_{0,F}$ 的理论方向为参考方向, 首先将故障前、后的各零序电流都投影到参考方向, 然后再求取投影值的差, 就消除了 CT 测量误差的影响。最大投影差值 $\Delta(I \sin \varphi)$ 的选线方法就是基于这个原理构成的: “首先通过 PT 引入一个正弦电压作为中间参考信号, 使系统各条线路在发生故障前的零序电流 $3\dot{I}_{0,i}$ (此时只有 CT 的不平衡电流 \dot{I}_{bp}) 具有固定的相位关系。然后将故障前零序电流 $3\dot{I}'_{0,i前}$ 和故障后零序电流 $3\dot{I}'_{0,i后}$ 同时在 $3\dot{I}'_{0,F}$ 的理论方向上进行投影, 并计算各条线路故障前后投影的差值 $\Delta I_{0,i}$, 最后找到差值 $\Delta I_{0,i}$ 中最大值 $\Delta I_{0,k}$, 就得到系统的最大投影差值 $\Delta(I \sin \varphi)$ 。显然, 当 $\Delta I_{0,k} \geq 0$ 时, 可判定线路 k 发生了单相接地故障, 否则判定母线发生故障。”

2 差分滤波算法原理

设有模拟信号 $x(t)$, 以采样周期 T_s 对其进行采样。 $t = nT_s$ 时刻的采样值记为 $X(nT_s)$, 在 t 时刻的前 k 个采样周期时刻, 即 $t = nT_s - kT_s$ 时刻的采样值记为 $X(nT_s - kT_s)$, 对两个时刻采样值求差值, 有:

$$Y(nT_s) = X(nT_s) - X(nT_s - kT_s) \quad (1)$$

上式可以简写为

$$y(n) = x(n) - x(n - k) \quad (2)$$

式(2)为差分滤波算法的数学模型。它是一个 k 阶的差分方程, k 称为差分滤波器数据窗的长度。

差分滤波器在微机保护装置中的实现过程只需要对两个不同采样时刻的采样值作减法运算, 其计算量极小。在保护算法中引入差分滤波算法, 因计算量所引起的算法延迟几乎可以忽略不计。

3 采用差分滤波算法优化最大 $\Delta(I \sin \varphi)$

3.1 优化算法基本原理

首先我们注意到: 1) 绝大多数小电流接地系统与负荷之间是通过变压器联接的; 2) 电网运行时, 系统所带负荷在连续数秒内一般不会发生突变。所以, 电力系统中 CT 输出的不平衡电流不可能发生突变。也就是说, 在电力系统发生故障后的暂态阶段, CT 输出的不平衡电流可近似认为与故障前的

不平衡电流是相等的(这一点可由现场的实际运行数据得以验证)。

根据第2节的分析, 采用差分滤波算法对零序电流信号的采样数据进行数字滤波时, 当选择滤波算法的数据窗长度满足 $kT_s = T_1$ (T_1 为零序电流的基波周期, k 为每基波周期内采样的点数, 本装置 $k = 20$) 时, 差分滤波算法可以滤除零序电流信号中的基波及各次谐波。在电力系统正常运行或者单相接地故障进入稳态后, 滤波器的输出为 0; 在故障后的 kT_s 时间内, 差分滤波算法才有输出, 此时输出的是故障后的参数与故障前的参数之差, 由于故障前后 CT 输出的不平衡电流是相等的, 所以在这一时间段内, CT 的不平衡电流被数字滤波器完全滤除了, 剩余的信号就是故障分量, 是系统故障后各条出线真实的零序电流, 其输出持续 20 ms。这是采用差分滤波算法优化最大 $\Delta(I \sin \varphi)$ 方法进行故障选线的主要依据。

由于在故障后的 20 ms 内, 能够得到系统发生单相接地故障后各出线真实的零序电流, 其中不包含 CT 的不平衡电流。因此我们可以通过直接比较系统故障后 $3\dot{I}_{0,N}$ 及 $3\dot{I}_{0,F}$ 的大小及方向, 实现故障选线功能。在小电流接地系统中发生单相接地故障时, 接地点一般均存在有过渡电阻, 所以故障后的 $3\dot{I}_{0,N}$ 、 $3\dot{I}_{0,F}$ 与 $3\dot{U}_0$ 之间的相位关系并不是严格的 90° , 为了方便比较, 需要将故障后的 $3\dot{I}_{0,N}$ 及 $3\dot{I}_{0,F}$ 投影到 $3\dot{I}_{0,F}$ 的理论方向(即滞后 $3\dot{U}_0$ 90° 的方向)再行比较。

还须说明, 由于采用过补偿方法, 在中性点经消弧线圈接地电网中发生单相接地时, 电容电流得到补偿使故障线路和非故障线路的零序电流在数值上减小到差不多相等, 方向均由母线流向线路^[18-20]。显然, 上述的基于零序电流基波参数作为故障选线依据的方法不能再使用。在实际电网中, 中性点的消弧线圈对系统中零序电流5次谐波分量所呈现的容抗比基波小4倍, 而阻抗则大4倍。所以, 中性点的消弧线圈对零序电流5次谐波电容电流的补偿作用比基波分量小得多。也就是说, 零序电流5次谐波的分布特征受中性点消弧线圈的影响很小。所以, 在中性点经消弧线圈接地电网中, 可以采用零序电流5次谐波分量代替基波分量作为故障选线的依据。

3.2 优化后算法实现故障选线的主要步骤

在微机保护装置中, 获得正弦电流和电压信号的最大值比获得有效值更为简便, 因而通常采用电流、电压信号的最大值(下面描述过程中通过在右下标加“m”表示该电气量值为最大值)作为判据。

实际的微机保护装置可以对同一个变电所的多条母线以及多个电压等级实现同步故障选线, 并能方便地进行功能扩展。为了方便描述, 仍以有 4 条出线的单母线组成的电网为例, 说明以改进的最大投影差值方法来实现故障选线的流程。

1) 通过 CT 和 PT, 微机保护装置实时对流过 4 条出线保护安装处的零序电流 $3\dot{I}_{0,i}$ ($i=1,2,3,4$, 下同) 和母线上的零序电压 $3\dot{U}_0$ 进行数字采样。为了采用差分滤波算法对采样数据进行滤波处理, 需要最少对最新一个周波的采样数据进行保存;

2) 采用微机保护算法计算母线零序电压幅值 $3U_{0,m}$, 如果检测到 $3U_{0,m}$ 大于 $15\sqrt{2}$ V (绝缘检测装置的整定值) 时, 说明电网某处发生了单相接地故障。并立刻对该条母线上的各出线故障后第一周期的零序电流进行采样, 故障后电流值与其故障前的电流值进行差分滤波计算, 滤波器在故障发生后的一个周波内有输出, 输出的信号便是系统故障后各出线所出现的真实的零序电流, 即故障分量; 该故障分量也正好为各条出线故障后、前的零序电流的相量差 $\Delta\dot{I}_{0,i}$ 。

3) 计算相量差 $\Delta\dot{I}_{0,i}$ 的有效值 $\Delta I_{0,i}$ 以及 $\Delta\dot{I}_{0,i}$ 落后 $3\dot{U}_{0,m}$ 的相位 φ_i ($0^\circ \sim 360^\circ$), 再计算 $\Delta\dot{I}_{0,i}$ 在 $3\dot{I}_{0,F}$ 理论方向 (即滞后 $3\dot{U}_{0,m}$ 90° 方向) 的投影值 $\Delta I_{0,i} \sin \varphi_i$ 。

4) 然后计算 $\Delta I_{0,k} = \max \{ \Delta\dot{I}_{0,i} \sin \varphi_i \}$ 。当某条出线的计算值 $\Delta I_{0,k} > I_{set}$ 时 (I_{set} 为电网故障选线整定值, 根据电网出线条数及各出线长短计算得到), 说明该 k 条出线发生单相接地故障; 当计算值 $\Delta I_{0,k} \leq 0$ 时, 说明母线上发生单相接地故障。

3.3 优化后算法的主要优点

最大 $\Delta(I \sin \varphi)$ 故障选线方法经过差分滤波算法改进后, 其可靠性和快速性均得到很大提高, 具体表现在:

1) 改进后算法不再需要引入额外的正弦电压作为参考信号, 可靠性得到提高;

2) 改进后算法不再需要多次求取电压和电流之间的相位关系, 计算量大大降低;

3) 最大 $\Delta(I \sin \varphi)$ 故障选线方法首先通过计算故障前、后零序电流在 $3\dot{I}_{0,F}$ 理论方向上的投影, 再求投影后的差值进行故障选线; 而改进后方法能直接得到故障前后的电流差值, 省去大量的投影过程, 减少了乘法运算, 使计算量再次减少。

4 仿真实验及事故案例分析

4.1 仿真模型

小电流接地系统是电力传输网络的中间环节,

可以采用电路等效原理及电网分割理论将小电流接地系统从电网中分离出来, 用三相无穷大容量电源作为系统的输入, 系统负荷采用固定大小值。利用 Matlab 仿真软件建立小电流接地系统仿真模型, 如图 4 所示。该模型是一个 10 kV 配电网馈线系统, 由 5 条架空线路构成。

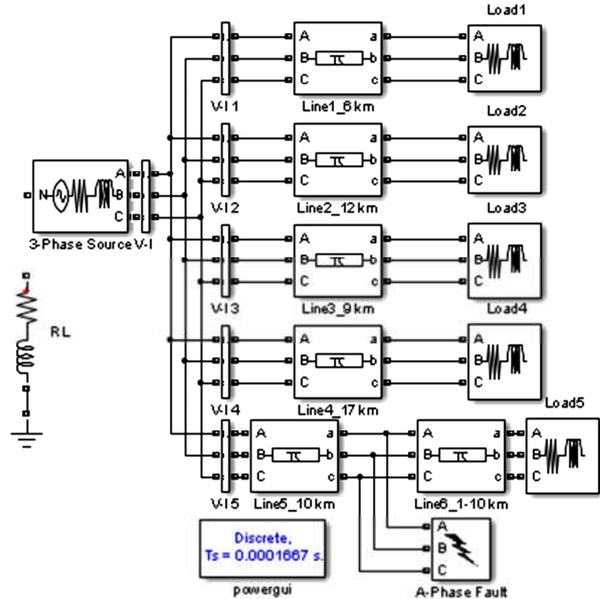


图 4 仿真模型结构原理图

Fig. 4 Principle diagram of simulation model structure

实际应用中, 10 kV 输电线路的输电距离一般为 6~20 km, 仿真模型中各条线路的长度分别为 6 km、12 km、9 km、17 km 和 20 km。

线路的正序参数 R_1 、 L_1 、 C_1 分别为 0.233 Ω/km 、0.994 mH/km、0.233 $\mu\text{F}/\text{km}$; 零序参数 R_0 、 L_0 、 C_0 分别为 0.445 Ω/km 、4.116 mH/km、0.038 $\mu\text{F}/\text{km}$ 。

当采用经消弧线圈接地模型进行仿真时, 消弧线圈的取值按 110% 过补偿进行整定。经计算得到消弧线圈的参数为 $R_L = 6.77 \Omega$ 、 $L = 0.262 \text{ H}$ 。通过三相电源中性点实现经消弧线圈接地。

负荷分别取 1 MW、0.2 MW、2.0 MW、1.2 MW 和 1.6 MW。

根据 3.1 节的分析, 当采用差分滤波算法处理采样数据时, CT 的不平衡电流被滤除, 即 CT 的不平衡电流不会影响故障选线的仿真结果。因此, 在仿真模型中没有引入 CT 不平衡电流的仿真模块。

4.2 仿真结果

本文在图 4 所示模型下以线路 L5 发生单相接地故障为例, 给出不同情况下的仿真结果。其中, 采

样频率为10 kHz。随机设置故障发生时的故障角、过渡电阻、故障位置和中性点接地方式等因素模拟单相接地故障。再利用优化后的最大投影差值方法进行故障选线，选线结果列于表1中。在表1中，分别用 R_f 、 θ 、 X_f 、NUS和NES表示故障点的过渡电阻、故障发生时的初相角、故障点到母线之间的距离、中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。表中故障选线结果的正确率为100%。

表 1 故障选线结果表

Table 1 Results of fault line selection

R_f / Ω	$\theta / (^{\circ})$	X_f / km	Y_0	$\Delta I_{0,k}$	选线结果
0	0	1.0	NUS	0.60 1.20 0.91 1.72 29.59	L5
0	90	1.0	NUS	0.56 1.14 0.89 1.72 29.66	L5
0	180	1.0	NUS	0.60 1.22 0.91 1.70 29.81	L5
20	90	1.0	NUS	0.58 1.16 0.87 1.64 28.49	L5
200	90	1.0	NUS	0.26 0.53 0.39 0.74 12.95	L5
2000	90	1.0	NUS	0.03 0.06 0.04 0.08 7.488	L5
0	90	4.0	NUS	0.55 1.14 0.87 1.70 28.23	L5
0	90	8.0	NUS	0.51 1.03 0.78 1.48 26.60	L5
0	90	16.0	NUS	0.46 0.92 0.69 1.32 23.43	L5
0	90	0.0	NUS	-0.5 -1.3 -0.98 -1.6 -2.03	母线
0	0	1.0	NES	0.61 1.22 0.91 1.74 4.47	L5
0	90	1.0	NES	0.54 1.13 0.86 1.56 4.09	L5
0	180	1.0	NES	0.61 1.23 0.91 1.72 4.46	L5
20	90	1.0	NES	0.61 1.22 0.92 1.72 4.46	L5
200	90	1.0	NES	0.56 1.12 0.84 1.58 4.10	L5
2000	90	1.0	NES	0.14 0.28 0.21 0.39 2.08	L5
0	90	4.0	NES	0.56 1.54 0.88 1.16 4.20	L5
0	90	8.0	NES	0.56 1.14 0.88 1.63 4.20	L5
0	90	16.0	NES	0.53 1.06 0.79 1.51 3.89	L5
0	90	0.0	NES	-0.4 -1.2 -0.88 -1.4 -2.93	母线

实际电网中，通常是经过间歇性的电弧发生单相接地的。电弧的形成过程非常复杂，难以采用标准的数学模型来仿真通过电弧实现单相接地故障。本文采用压控开关的开合来近似模拟电弧的重燃和熄灭过程，然后利用图4的仿真模型模拟电弧单相接地故障，并利用最大投影差值方法进行故障选线，选线结果列于表2中。表中结果表明，系统通过电弧发生单相接地时，该方法也能正确地进行故障选线。

优化后算法在不同情况下发生单相接地故障时，可以正确选出故障线路，且优化算法能大大减少运算次数，减小算法的延迟时间。对几种情况下的计算次数进行比较，结果如表3所示。

表 2 发生电弧故障时的故障选线结果

Table 2 Fault line selection results of arc-grounding fault

R_f / Ω	$\theta / (^{\circ})$	X_f / km	Y_0	$\Delta I_{0,k}$	选线结果
30	90	1.0	NUS	0.70 1.21 0.77 1.44 27.35	L5
130	90	1.0	NUS	0.39 0.47 0.76 0.77 11.22	L5
200	90	1.0	NUS	0.13 0.16 0.11 0.10 8.472	L5
30	90	0.0	NUS	-0.5 -1.2 -0.91 -1.4 -2.24	母线
30	90	4.0	NES	0.66 1.42 1.02 2.03 4.46	L5
130	90	8.0	NES	0.56 1.06 0.86 1.55 4.10	L5
200	90	16.0	NES	0.39 0.58 0.71 0.69 3.28	L5
30	90	0.0	NES	-0.4 -1.1 -0.98 -1.3 -2.17	母线

表 3 算法改进前后的计算次数对比结果

Table 3 Algorithm comparison results of the computing times before and after improvement

R_f / Ω	$\theta / (^{\circ})$	X_f / km	需要计算次数	
			改进前	改进后
0	0	1.0	31 589	12 892
0	90	1.0	36 774	14 436
0	180	1.0	43 003	12 085

4.3 事故案例分析

为了更好地验证本文所述方法，对采用了该算法的微机保护装置的某4个变电所的6起单相接地故障事故案例进行了分析。其中，1个变电所采用中性点经消弧线圈接地方式，母线上有3条电缆出线；其他3个变电所采用中性点不接地方式，母线上出线为电缆转架空线路或架空线路。

根据事故分析报告，这6起单相接地故障中有3起为间歇性线路接地故障，1起为母线稳定接地故障，其他2起为线路弧光接地故障(均造成电压互感器保险丝熔断)。从故障现象的报警记录可以看出，这6起事故案例中的微机保护装置的故障选线结果均正确。

5 结论

广泛应用的最大投影差值微机保护方法经差分滤波算法优化后，其可靠性和快速性均得到较大提高；在小电流接地电网中发生单相接地故障时的故障选线准确度也显著提高，是目前比较成功、完善的故障选线新方法。该方法已在多种型号的微机保护装置(如 WXH-82X 型)中采用，到目前为止，现场反馈的数据均表明该方法的故障选线正确率可达100%，是一种极有推广价值的微机保护方法。

参考文献

- [1] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [2] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的HHT变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.
REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Fault line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang Transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.
- [3] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 64-68.
YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A fault feeder selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
- [4] 贾清泉, 王振宇, 王宁, 等. 基于参数辨识的消弧线圈接地电网单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 77-85.
JIA Qingquan, WANG Zhenyu, WANG Ningdong, et al. A single-phase-to-ground fault locating algorithm for arc-suppression-coil earthed power distribution systems based on parameter estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 77-85.
- [5] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [6] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [7] 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.
TAN Guobiao, TU Dongming, CHEN Dapeng. Micro-computerized faulty line discriminator based on theory of maximizing $I \sin \varphi$ or $\Delta(I \sin \varphi)$ [J]. Electric Power, 1995, 25(7): 16-20.
- [8] 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.
JIAN Jinbao, WANG Yuanyuan, ZENG Xianjun, et al. Earth fault feeder detection based on hierarchical clustering analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 111-115.
- [9] 史庆岩, 何为, 杨帆. 基于模拟退火遗传算法的接地网故障磁场诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 52-55.
SHI Qingyan, HE Wei, YANG Fan. Magnetic fault diagnosis of grounding grid based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 52-55.
- [10] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 变电站接地网结构判断与缺陷诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24): 113-118.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhibin. Method of structure estimation and fault diagnosis of substations grounding grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(24): 113-118.
- [11] 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.
XUE Yongduan, LI Tianyou, LI Weixin, et al. A novel method of transient analysis and faulty selection location for single-phase earth fault in non-effectively earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 101-106.
- [12] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [13] 贾清泉, 石磊磊, 田杰, 等. 数字化变电站中故障选线智能电子设备模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 63-68.
JIA Qingquan, SHI Leilei, TIAN Jie, et al. Fault line selection IED model for digital substation[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 63-68.
- [14] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [15] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97.
- [16] 何连杰, 史常凯, 闫卓, 等. 基于广义S变换能量相对熵的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 274-280.
HE Lianjie, SHI Changkai, YAN Zhuo, et al. A fault section location method for small current neutral grounding system based on energy relative entropy of generalized S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 274-280.
- [17] 汤涛, 黄纯, 江亚群, 等. 基于馈线零序阻抗特性的谐振接地故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 192-201.
TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A method of fault line selection in resonant earthed system based on zero sequence impedance characteristic of lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 192-201.
- [18] 刘洋, 郭威, 邢春阳, 等. 基于双树复小波变换的配电网故障选线[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 121-126.
LIU Yang, GUO Wei, XING Chunyang, et al. Fault Line Selection for Power Distribution Network Based on Dual-tree Complex Wavelet Transform[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 121-126.
- [19] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电网单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.

收稿日期: 2017-02-05; 修回日期: 2017-04-27

作者简介:

杨正理(1971—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: zhengli-yang@163.com

(编辑 魏小丽)