

DOI: 10.7667/PSPC171552

基于双端信息的高压架空线断线故障识别原理

卢正飞¹, 蔡宜君², 刘子俊¹, 朱可凡², 胡子珩¹, 王玉玺², 文明浩²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 强电磁工程与新技术
国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 高压架空线路受外力和雷击影响容易发生断线故障, 而目前的线路保护装置需要故障线路落地后才能准确对断线故障进行识别。针对目前缺乏专门的断线故障保护方法的问题, 提出一种基于双端信息的线路断线故障保护新原理。新原理利用线路两端的电压、电流信息, 分别计算各相线路“计算电压降落”和“测量电压降落”, 并根据两种电压降落之差的幅值和线路电流的大小, 实现了断线故障的快速可靠识别。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台对所提保护原理进行了仿真验证。

关键词: 架空线; 断线故障; 测量电压降落; 计算电压降落

A line break fault protection algorithm for high voltage overhead line based on two-terminal information

LU Zhengfei¹, CAI Yijun², LIU Zijun¹, ZHU Kefan², HU Ziheng¹, WANG Yuxi², WEN Minghao²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd, Shenzhen 518001, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Affected by external force and lightning strike, the high voltage overhead line is easy to be broken. But the current line protection device can only identify the line break fault accurately after the fault line landing. In view of the problem that there is no protection algorithm especially for line break fault, a novel protection based on two-terminal information is presented in this paper. According to the voltage and current information on both sides, the calculated voltage drop and the measured voltage drop of each phase line are calculated respectively. Then the line break fault is quickly and reliably determined by calculating the magnitude of the difference of the two voltage drops and the magnitude of the line current. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the protection algorithm in PSCAD/EMTDC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477061).

Key words: high voltage overhead line; line break fault; measured voltage drop; calculated voltage drop

0 引言

与电缆线路相比, 架空线路因具有成本低、输电容量大、散热条件好、易架设等优点而成为目前电能传输的主要通道^[1]。但同时, 架空线因直接暴露在大气中, 受环境的影响较大, 导致其故障概率远高于电缆线路^[2-3]。当架空线受机械外力或雷击时, 容易发生断线故障^[4-5]。相比于短路故障, 断线故障发生概率小、故障特性较轻, 故长久以来研究人员及设备生产厂家将主要精力都投入到高压输电线路短路故障的研究中^[6-12]。由于未配备专

门针对线路断线故障的保护装置, 发生断线故障后, 需要故障线路落地导致接地故障, 保护才能识别故障并进行切除^[13-14]。线路断线故障也可能导致电网闪断, 进而影响某些保护的動作^[15]。而目前, 高压架空线路与铁路、公路等交叉跨越较多, 发生断线故障后, 带电线路落地容易造成人身伤害及电气化铁路停运等安全事故^[16-17]。因此, 断线故障发生后, 迫切需求在故障线路落地之前识别并切除故障线路, 避免故障线路落地造成更严重的危害。

目前, 针对架空线断线故障的研究主要在对故障特性的分析上, 而在断线故障的保护原理方面研究较少。文献[6, 18-20]对断线故障和故障后保护动作情况进行了分析, 指出目前的保护装置难以识别

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477061)

单纯的断线故障；文献[21]指出了同塔四回线路单回线路纵向故障时，对于两侧均无电气联系的同塔线路，零序方向保护存在误动的风险，对于两侧均有电气联系的线路，零序方向不会误动；文献[22]指出了在断线故障导致接地故障的情况下，目前的保护装置能够可靠地动作，但其动作时间较慢，且带电线路落地后易造成人身伤害等事故；文献[13]提出了一种基于输电线路两侧零序功率方向的线路断线故障判别方法，但该方法不具备选相功能；文献[23]提出了一种根据线路两端开关信号和电压、电流信号的断线故障故障相识别方法，该方法所需变量较多，识别方法较为复杂。

总体上，目前针对高压架空线断线故障的研究仍不够充分，提出的故障判别算法实用性不强，且没有专门的应对架空线断线故障的保护装置问世。针对以上问题，提出了一种基于线路双端电气量的高压线路断线故障判别方法。所提方法利用线路两端的电压、电流信息，分别计算各相线路“计算电压降落”和“测量电压降落”，并根据两种电压降落之差的幅值和线路电流的大小，实现了断线故障的快速可靠识别。最后在 PSCAD/EMTDC 平台中仿真验证了所提保护原理的有效性。

1 保护基本原理

1.1 断线故障分析

当线路发生断线故障，线路还未落地造成接地短路时，除了断线相电流减小为线路电容电流之外，还会出现不对称分量，以单相断线故障为例，其复合序网如图 1 所示。图 1 中， $\dot{V}_F^{(0)}$ 为断线点断线前的电压， $\Delta\dot{V}_{F(1)}$ 、 $\Delta\dot{V}_{F(2)}$ 、 $\Delta\dot{V}_{F(0)}$ 分别为断线点电压的正序、负序和零序分量， $\dot{I}_{F(1)}$ 、 $\dot{I}_{F(2)}$ 、 $\dot{I}_{F(0)}$ 分别为断线点电流的正序、负序和零序分量， Z_{11} 、 Z_{22} 、 Z_{00} 分别为断线点的正序、负序、零序输入阻抗。

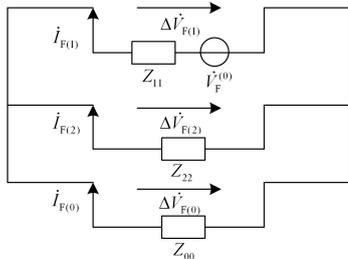


图 1 单相断线的复合序网

Fig. 1 Single phase disconnected composite sequence network

单相断线后断线处会出现负序电流和零序电流，各序分量电流值与负荷大小成正比^[5]，如下式所示

$$\dot{I}_{F(1)} = \frac{\frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}}{\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}} \dot{I}_{\text{load}} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{F(2)} = -\frac{\frac{1}{Z_{22}}}{\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}} \dot{I}_{\text{load}} \quad (2)$$

$$\dot{I}_{F(0)} = -\frac{\frac{1}{Z_{00}}}{\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}} \dot{I}_{\text{load}} \quad (3)$$

式中， \dot{I}_{load} 为断线前断线相的负荷电流。

与短路故障相比，断线故障对系统的冲击较小，发生断线故障后，系统会发生潮流转移，导致非故障相电流的变化，但母线电压还能基本保持稳定。正常运行时，输电线路两侧保护之间是一条完整的线路，而当线路发生断线故障时，由于故障相线路断口的存在，线路两侧保护之间不再是一条完整的线路，通过双端的电压、电流数据可以检测到这个阻抗的变化。基于以上分析，本文提出了一种基于线路双端电气量的高压线路断线故障判别原理。

1.2 基本原理

图 2 所示为典型的双端供电系统示意图，其中，MN 为架空线路；M、N 为线路两端母线； Z_m 、 Z_n 分别为两侧电源等值阻抗； $\dot{U}_{m\varphi}$ 、 $\dot{U}_{n\varphi}$ ($\varphi=a, b, c$) 分别为 M、N 侧保护安装处测量电压； $\dot{I}_{m\varphi}$ 、 $\dot{I}_{n\varphi}$ 分别为 M、N 侧保护安装处测量电流，正方向为母线指向线路。

根据 MN 线路两端的电压测量值 $\dot{U}_{m\varphi}$ 、 $\dot{U}_{n\varphi}$ 可计算线路上各相的“测量电压降落”如式(4)所示；同时，根据 MN 线路两端的电流测量值 $\dot{I}_{m\varphi}$ 、 $\dot{I}_{n\varphi}$ 和线路阻抗矩阵，可以计算线路上各相的“计算电压降落”如式(5)所示。

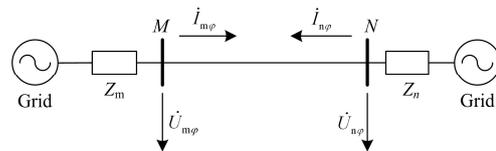


图 2 双端电源系统单线图

Fig. 2 Single line diagram of two terminal power supply system

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_a \\ \Delta\dot{U}_b \\ \Delta\dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{ma} - \dot{U}_{na} \\ \dot{U}_{mb} - \dot{U}_{nb} \\ \dot{U}_{mc} - \dot{U}_{nc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}'_a \\ \Delta \dot{U}'_b \\ \Delta \dot{U}'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(i_{ma} - i_{na}) \\ \frac{1}{2}(i_{mb} - i_{nb}) \\ \frac{1}{2}(i_{mc} - i_{nc}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: 阻抗矩阵对角元素为自阻抗, 非对角元素为互阻抗; 线路电流取两侧电流测量值之差的一半, 能够减小线路电容电流的影响。

根据式(4)和式(5)所示的线路两种电压降落的计算方法易知: 式(4)所示的“测量电压降落”始终能够准确代表线路两端各相的压降; 式(5)所示的“计算电压降落”仅能在正常运行或线路外故障时才能准确代表线路两端各相的压降, 而在线路内部发生短路或断线故障时, 因线路中包含故障点, 因此不能准确代表线路两端各相的压降。同时, 值得注意的是, 当线路中发生的故障为短路故障时, 线路中电流较大, 因三相线路互感的存在, 式(5)中 a、b、c 三相“计算电压降落”均不能代表线路各相的压降, 即“测量电压降落”与“计算电压降落”两者的 a、b、c 三相均不一致; 当线路中发生的故障为断线故障时, 故障相线路电流接近为 0, 互感导致其对非故障相“计算电压降落”的影响基本可以忽略, 于是(5)中的“计算电压降落”仅有故障相的计算结果不能准确代表线路的压降, 即“测量电压降落”与“计算电压降落”两者仅有故障相的结果不一致。由此可见, 将该原理用于断线故障识别时具有选相的功能。

将以上原理用于断线故障识别时, 应避免将短路故障误判为断线故障。由于线路发生短路故障时, 保护安装处电流较大; 而线路发生断线故障时, 保护安装处电流仅为电路电容电流, 故结合故障后保护安装处电流的大小, 即可识别线路断线故障, 防止短路故障时断线保护误动。另外, 目前保护一般在检测到有零序电流而无零序电压时判为 CT 断线, 但在交流线路发生断线故障时, 保护安装处零序电压可能很小, 从而将线路断线故障误判为 CT 断线。考虑到 CT 断线时, 该侧测量电流将从负荷电流减小至小于其无流整定值, 而对侧的测量电流则一直为负荷电流, 故根据此特点, 采用双端电气量可实现线路断线故障和 CT 断线的区分。

2 保护判据

定义各相“测量电压降落”和“计算电压降落”

之差为“电压降落差”用 $\Delta \dot{U}_{e\phi}$ 表示, 则

$$\Delta \dot{U}_{e\phi} = \Delta \dot{U}'_{\phi} - \Delta \dot{U}''_{\phi} \quad (6)$$

根据第 1 节中的分析, 可构造线路断线故障保护判据为

$$\begin{cases} |i_{\phi}| < I_{set} \\ |\Delta \dot{U}_{e\phi}| > U_{set} \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_{ϕ} 为保护安装处各相电流测量值; I_{set} 、 U_{set} 分别为电流、电压的整定值。

式(4)一式(7)中的相量计算均采用全周傅氏算法, 同时为躲避区外故障导致潮流转移等暂态过程, 式(7)所示判据采用故障后 40 ms 时刻的计算结果进行判断。

3 灵敏度分析

假设发生断线故障前后线路两侧母线电压保持不变, 断线相电流减小为 0。以 A 相断线为例, 发生断线故障前, 按照式(5)计算可得各相电压降, 这里忽略线路分布电容电流影响, 可以得到

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}'_a \\ \Delta \dot{U}'_b \\ \Delta \dot{U}'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时“测量电压降落”与“计算电压降落”相同。当发生断线故障后, 断线的 A 相电流为 0, 断线故障前后非故障相的“计算电压降落” $\Delta \dot{U}'_{\phi}$ 保持不变, 因此可将阻抗矩阵降为二阶, 得到断线故障后 B、C 相的电流为

$$\begin{bmatrix} i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}'_b \\ \Delta \dot{U}'_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(8)可得断线故障后 A 相的“计算电压降落”为

$$[\Delta \dot{U}''_a] = [Z_{ab} \quad Z_{ac}] \begin{bmatrix} i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(6)可计算得 A 相“电压降落差”为

$$\Delta \dot{U}_{ea} = \Delta \dot{U}'_a - \Delta \dot{U}''_a \quad (11)$$

以图 2 所示系统为例, 系统电压为 220 kV, 额定功率为 200 MW, 线路长度为 100 km, 线路单位长度正序电阻为 $r_1=0.044\ 965\ \Omega/\text{km}$, 正序电抗为 $x_1=0.380\ 88\ \Omega/\text{km}$, 零序电阻为 $r_1=0.134\ 9\ \Omega/\text{km}$, 零序电抗为 $x_1=1.142\ 64\ \Omega/\text{km}$ 。由式(8)一式(11), 求得故障相“电压降落差”与负荷电流关系如图 3 所示。

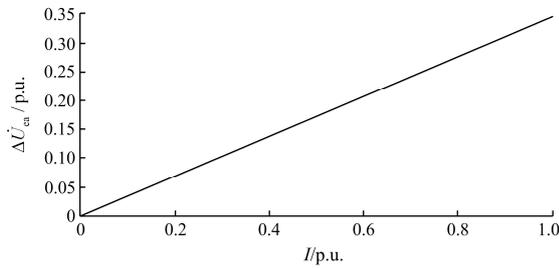


图3 故障相电压降落差与负荷电流的关系

Fig. 3 Relation between the voltage drop difference and the load current

由图3可以看出,“电压降落差”与负荷电流呈正相关,当负荷电流较小时,保护灵敏度不足。例如式(7)整定值 $U_{set}=0.022$ p.u.(220 kV 系统约为 5 kV) 时,当负荷电流小于 0.078 p.u.时发生断线故障,保护灵敏度不足。

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中建立图 4 所示的 220 kV 仿真模型,其中 S_1 、 S_2 、 S_3 分别为 18 kV、13.8 kV、16.5 kV 电源,并经 T_1 、 T_2 、 T_3 升压变压器升压为 230 kV; L、M、N、O、P、Q 为母线,线路 LM、MN、NO、OQ、QP、PL 均为 100 km,线路单位长度正序电阻为 $r_1=0.044\ 965\ \Omega/\text{km}$,正序电抗为 $x_1=0.380\ 88\ \Omega/\text{km}$,零序电阻为 $r_1=0.134\ 9\ \Omega/\text{km}$,零序电抗为 $x_1=1.142\ 64\ \Omega/\text{km}$; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为母线 M、P、O 上的负荷,可通过调整负荷的大小调整线路的潮流。在线路 MN 内、外分别设置故障点 f_1 、 f_2 ,考查 M 侧保护的動作情况。其中 f_1 为 MN 线路中点, f_2 为 MN 反向出口处。

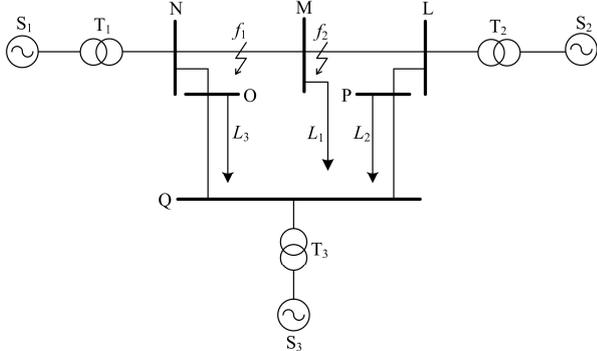


图4 仿真模型单线图

Fig. 4 Single line diagram of the simulation system

正常运行时,线路 MN 上有功潮流 200 MW; 图 5、图 6 分别给出了 1 s 时刻 f_1 处发生 A 相断线故障、AB 两相断线故障的情况下,1.04 s 后各相电

流幅值和电压降落差幅值。其中 I_{set} 、 U_{set} 分别取 0.1 kA、5 kV。

由图 5 可见:线路 MN 内部发生 A 相断线故障 40 ms 后,A 相电流幅值为 0.025 kA,小于整定值,而 B、C 相电流的幅值分别为 0.603 kA、0.578 kA,大于整定值;A 相电压降落差幅值为 77.940 kV,大于整定值,而 B、C 相的电压降落差幅值分别为 0.105 kV、0.080 kV,均小于整定值。因此,根据式(7)所示判据,保护准确地判为线路 MN 内部 A 相断线故障。

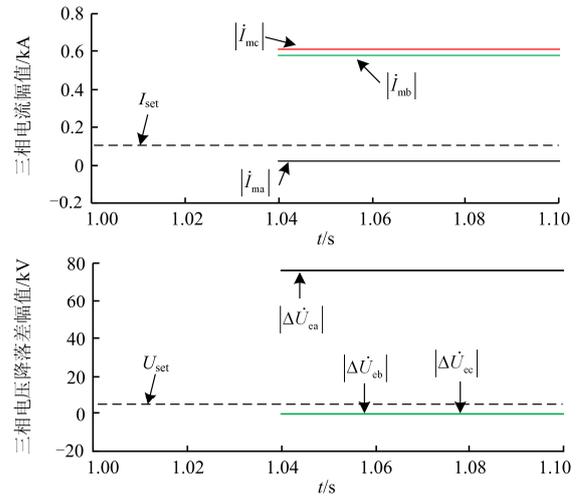


图5 f_1 处发生 A 相断线故障时的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of A phase break fault at f_1

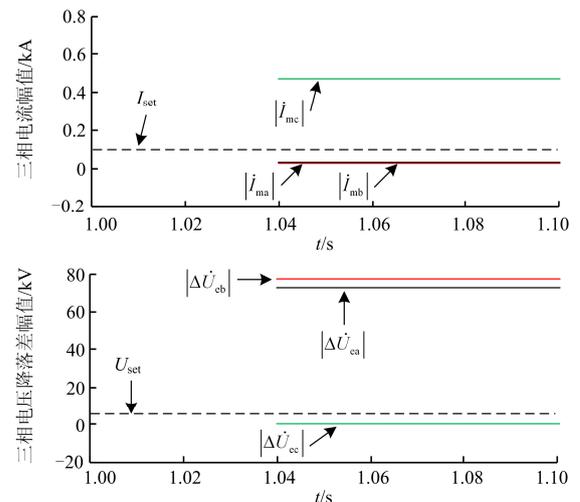


图6 f_1 处发生 AB 两相断线故障时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of AB phase break fault at f_1

由图 6 可见:线路 MN 内部发生 AB 两相断线故障 40 ms 后,A、B 两相电流幅值分别为 0.026 kA、0.025 kA,小于整定值,而 C 相电流的幅值为 0.465

kA, 大于整定值; A、B 两相电压降落差幅值分别为 72.249 kV、76.735 kV, 大于整定值, 而 C 相的电压降落差幅值为 0.064 kV, 小于整定值。因此, 保护准确地判为线路 MN 内部 AB 两相发生断线故障。

图 7 给出了 1 s 时刻 f_2 处发生 A 相断线故障时的仿真结果。从图 7 可见, 故障发生后 40 ms 时,

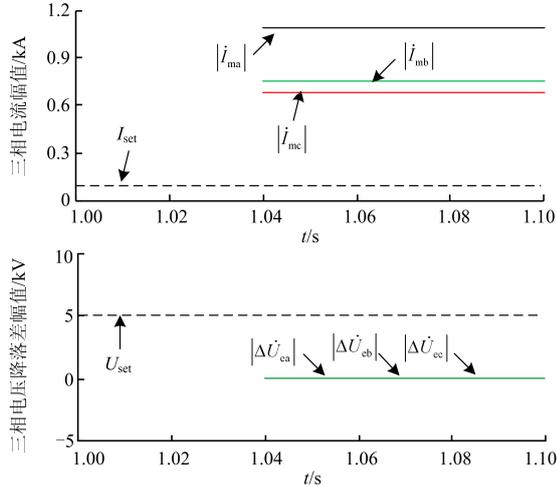


图 7 f_2 处发生 A 相断线故障时的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of A phase break fault at f_2

A、B、C 相电压降落差幅值分别为 0.167 kV、0.100 kV、0.109 kV, 均小于整定值, 保护判定为非区内断线故障。

为进一步验证保护算法的性能, 表 1 给出了在 f_1 、 f_2 处分别发生 A 相断线、AB 两相断线、单相接地故障时的仿真结果, 其中电流、电压差幅值均为故障后 40 ms 时刻的值。

从表 1 可以看出, 当线路内部发生断线故障时, 保护能够在 40 ms 时准确识别, 且具备选相功能, 可实现分相动作; 当线路内部发生短路故障或区外发生故障时, 断线保护算法能够准确判为非区内断线故障, 不发生误动。

为验证保护算法的灵敏性, 仿真分析线路在不同潮流情况下 f_1 处发生断线故障时保护的判断情况, 如表 2 所示。从表 2 可以看出, 随着线路潮流的减小, 例如减小为 10 MW 时, 非故障相(BC 相)的电流幅值小于 I_{set} , 但此时仅有故障相(A 相)电压降落差大于 U_{set} , 断线保护正确动作; 然而如果潮流继续减小, 线路轻载甚至空载时, 故障相电压降落差也小于 U_{set} , 此时保护不能识别断线故障, 发生拒动。

表 1 各种故障下的仿真结果

Table 1 Simulation results under various faults

故障位置	故障类型	电流幅值/kA			电压降落差/kV			判断结果
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	
f_1	A 相断线	0.025	0.603	0.578	77.940	0.105	0.080	区内 A 相断线
	AB 相断线	0.026	0.025	0.465	72.249	76.735	0.064	区内 AB 相断线
	A 相接地	1.676	0.680	0.714	6.931	3.010	2.839	非区内断线故障
f_2	A 相断线	1.081	0.684	0.750	0.167	0.100	0.109	非区内断线故障
	AB 相断线	1.067	1.111	0.802	0.161	0.152	0.126	非区内断线故障
	A 相接地	2.646	0.694	0.831	12.292	4.655	4.522	非区内断线故障

表 2 不同潮流下 f_1 处发生 A 相断线故障时的仿真结果

Table 2 Simulation results of A phase break fault at f_1 under different power flow

故障位置	线路潮流/MW	电流幅值/kA			电压降落差/kV			判断结果
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	
f_1	200	0.025 4	0.603 1	0.578 1	77.94	0.105	0.080	区内 A 相断线
	100	0.027	0.292	0.291	41.27	0.056	0.044	区内 A 相断线
	10	0.028	0.027	0.037 9	7.253	0.024	0.029	区内 A 相断线
	1	0.027	0.005	0.007	3.653	0.065	0.062	非区内断线故障

5 结论

本文对高压架空线路断线故障进行了研究, 利用线路两端电压、电流信息, 提出了一种高压架空线断线故障保护新原理, 并通过仿真验证了所提方法的有效性, 主要得出以下结论。

1) 区外故障时, “测量电压降落”与“计算电

压降落”基本一致, 电压降落差幅值较小; 区内断线故障时, 故障相“测量电压降落”与“计算电压降落”差别较大, 电压降落差幅值较大, 非故障相两种电压降落基本一致, 电压降落差幅值小。

2) 所提断线保护算法原理简单, 能够有选择性地切除断线故障线路, 且具有选相功能。

3) 所提断线保护算法存在死区, 在轻载条件下

容易拒动, 需进一步研究轻载情况下的断线保护算法。

参考文献

[1] PONGTHAVORNSAWAD A, RUNGSEEVIJITPRAPA W. Broken conductor detection for overhead line distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 525-530.

[2] 杨军, 伍咏红, 江文波, 等. 基于双端故障信息的高压电缆-架空线混合线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 208-213.
YANG Jun, WU Yonghong, JIANG Wenbo, et al. A fault location algorithm for hybrid transmission line composed by high voltage cable and overhead line based on two-terminal information[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 208-213.

[3] 杨军, 潘雪莉, 江文波, 等. 一种高压电缆-架空线混合线路智能重合闸方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 65-70.
YANG Jun, PAN Xueli, JIANG Wenbo, et al. Reclose scheme of HV overhead line with underground power cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 65-70.

[4] 高源, 孙学东, 张喆, 等. 10 kV 架空裸导线雷击断线机理仿真与试验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 129-133.
GAO Yuan, SUN Xuedong, ZHANG Zhe, et al. Simulation and experimental research on lightning-caused breaking mechanism of 10 kV overhead line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 129-133.

[5] 郭圣, 曾懿辉, 等. 输电线路防外力破坏智能监控系统的应用[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 139-143.
GUO Sheng, ZENG Yihui, et al. Application of intelligent monitoring system for external force damage prevention for transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 139-143.

[6] 张加贝, 陈汝昌, 王帮灿. 220 kV 线路单相断线故障分析与处理[J]. 云南电力技术, 2014, 42(6): 117-120.
ZHANG Jiabei, CHEN Ruchang, WANG Bangcan. Analysis and disposal for single-phase line break fault of 220 kV transmission line[J]. Yunnan Electric Power, 2014, 42(6): 117-120.

[7] 陈念, 吕艳萍, 周凯, 等. 110 kV 电阻接地系统零序方向电流保护的整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 91-96.
CHEN Nian, LÜ Yanping, ZHOU Kai, et al. Research on setting calculation of zero sequence directional overcurrent protection for 110 kV neutral point grounding via resistance system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 91-96.

[8] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 基于零序差动阻抗的输电线路保护新原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 11-17.
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. Transmission line protection principle based on zero sequence differential impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 11-17.

[9] 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.

[10] 桂勋, 刘志刚, 韩旭东, 等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 63-69.
GUI Xun, LIU Zhigang, HAN Xudong, et al. An accurate algorithm of two-terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 63-69.

[11] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 9-14.
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, KANG Xiaoning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14.

[12] 杨新伟, 郭彩霞. 基于主频零序功率的配电网故障选线新方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 33-37.
YANG Xinwei, GUO Caixia. A new method of fault line selection for distribution network based on zero sequence power of the main frequency[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 33-37.

[13] 赵青春, 谢华, 陆金凤, 等. 基于两侧零序功率方向的输电线路断线区域判别方法: 中国, 201611119546.4[P]. 2017-04-26.

[14] 马力, 郭伟伟. 一种识别线路单相或者两相断线的继电保护方法: 中国, 201610892866.7[P]. 2017-01-04.

[15] 马慧, 张开如, 高芳, 等. 电网闪断对距离保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 81-86.
MA Hui, ZHANG Kairu, GAO Fang, et al. Effect of

- power grid flash broken on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 81-86.
- [16] 何智祥, 曾永浩, 梁唐杰, 等. 基于负载电压偏移的自适应零线断线保护原理与实现[J]. 广东电力, 2016, 29(10): 116-120.
HE Zhixiang, ZENG Yonghao, LIANG Tangjie, et al. Protection principle for self-adaptive zero line disconnection based on load voltage excursion and its implementation[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 116-120.
- [17] 马腾. 10 kV 配电线路断线故障检测与定位研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
MA Teng. Line-break fault detection and location of 10 kV distribution line[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [18] 彭建宁, 魏莉. 110 kV 输电线路单相断线故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(18): 75-77.
PENG Jianning, WEI Li. Analysis on single-phase disconnection fault of a 110 kV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(18): 75-77.
- [19] 阳家书, 李国友, 孙建华. 一次 110 kV 线路单相断线故障的继电保护动作分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(22): 58-60.
YANG Jiashu, LI Guoyou, SUN Jianhua. Analysis of relaying operation on a single phase breakoff fault of 110 kV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(22): 58-60.
- [20] 刘亚新. 500 kV 神侯 I 回断线故障分析[J]. 电力设备, 2005, 6(10): 48-49.
LIU Yaxin. Fault Analysis of broken line on 500 kV Shen-Hou No.1 line[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(10): 48-49.
- [21] 张旭升, 李旭, 樊占峰, 等. 同塔四回线路纵向故障对零序方向保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 114-120.
ZHANG Xusheng, LI Xu, FAN Zhanfeng, et al. Influence research of longitudinal fault on zero sequence direction protection for four parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 114-120.
- [22] 王薇, 叶远波. 一起断线加单相接地故障的保护动作分析[J]. 上海电力, 2008(4): 392-394.
WANG Wei, YE Yuanbo. Analysis of protective action of a single phase grounding fault[J]. Shanghai Electric Power, 2008(4): 392-394.
- [23] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 35-38.
ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38.

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2018-02-05

作者简介:

卢正飞(1986—), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护工作; E-mail: luzhengfei@sz.csg.cn

文明浩(1973—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、新型继电保护原理。E-mail: swenmh@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)