

输电线路断线故障保护逻辑分析及附加判别方法

陈 军¹, 隋佳闽², 赵子涵¹, 杨向飞¹, 向 博¹, 易建波²

(1. 国网四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610041; 2. 电子科技大学电力系统
广域测量与控制四川省重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 目前架空输电线路继电保护装置针对断线故障缺乏快速、准确的识别方法, 导致断线故障判决、处理不及时, 容易引起关联设备损坏及重大安全事故。针对断线故障后主保护和后备保护动作逻辑进行分析, 阐释距离保护和零序电流保护拒动机理, 并进一步提出输电线路断线故障的快速判别方法。该方法利用输电线路断线后线路两侧故障相的电压、电流变化特征构建附加断线保护判据, 实现了对简单断线故障和断线再接地故障的快速识别和保护。最后, 通过 PSCAD 输电网仿真分析和四川省某水电外送线路实例测试, 验证了断线故障附加判别和保护方法的可行性和有效性。

关键词: 输电线路; 断线故障; 距离保护; 零序电流保护; 故障识别

Protection logic analysis and additional judgment method of a transmission line break fault

CHEN Jun¹, SUI Jiamin², ZHAO Zihan¹, YANG Xiangfei¹, XIANG Bo¹, YI Jianbo²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Dispatching Control Center, Chengdu 610041, China;
2. Laboratory of Wide-area Measurement and Control on Power System of Sichuan Province,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: There is a lack of a fast and accurate identification method for the broken line fault on a relay protection device on an overhead transmission line. This means that judgment and treatment of the fault is not likely to be timely, and it is easy for associated equipment damage to be caused as well as major safety incidents. This paper analyzes the action logic of main and backup protection after a line break fault, explains the mechanism of why distance and zero sequence current protection may refuse to operate, and puts forward a fast identification method for the fault. Based on the variation characteristics of voltage and current of fault phases on both sides of transmission line after a line break, an additional line break protection criterion is constructed to realize the fast identification and protection scheme of both a simple line break fault and a line break re grounding fault. Finally, through PSCAD transmission network simulation analysis and a case test of a hydropower transmission line in Sichuan Province, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0905000).

Key words: transmission line; line break fault; distance protection; zero sequence current protection; fault identification

0 引言

输电线路的运行特性容易受到绝缘老化、环境侵蚀、复杂气象、人为破坏等因素的影响, 近年来断线故障的发生比例逐年增高^[1-7]。断线故障会使输电变电系统处于非全相运行状态, 若处理不及时, 容

易引起关联设备损坏及重大安全事故^[8-11]。继电保护装置主要针对线路上的短路和接地故障, 对于断线故障的诊断和保护整定问题已相当棘手^[12-15]。

文献[16]详细讨论了输电线路发生断线故障后主保护和后备保护的反应情况, 指出现有的保护装置不能及时处置断线故障。文献[17]研究了基于电压判据的断线类型及故障区段的判断方法, 文献[18]进一步拓展了基于电压变化的故障识别附加判据, 并在小电流接地配电网中验证了可行性。文献[19]

提出了一种两相电源转换为三相电源的组合变压器,并分析组合变压器在不同相位发生断线故障时的不同接线方式,最后通过控制开关装置自动调整接线方式来实现自适应控制。文献[20]分析了中压配电网断线后断口两侧电压与电流以及对称分量的幅值、相位特点。文献[21]针对断线故障后线路各处的零序电压的特征进行研究,并给出一种基于零序电压幅值差的保护方法。文献[22-23]针对主动配电网的断线故障分别提出利用负序电流和 DG 输出电流的变化特征建立断线故障保护判据。文献[24]针对不同接地方式的配电网,分析故障前后序电流和中性点电压的特征,并以此给出保护判据。文献[25]提出利用馈线和变压器的终端单元上报的电压信息进行断线故障定位。上述方法将断线故障转入对称分量法判别,但对称相序参数受线路实际工况影响较大,制定判据的阈值混叠情况较为严重,误判、漏判几率较高,不利于推广。

综上所述,目前对于输电线路断线故障保护问题已得到充分重视,但是准确实用的故障判决和保护方案还亟待深研。本文首先从电气特性上讨论输电线路发生简单断线故障、断线再接地故障后,线路两侧的故障相电压、电流变化特征,并分析输电线路两端的距离保护和零序电流保护的故障识别和动作情况。然后以故障相的电流、电压特征为基础,构建两种断线故障的附加识别判据,并完善了输电线路断线故障的保护逻辑。最后通过仿真分析和实际应用证实了所提保护方法的合理性和可行性。

1 断线故障保护逻辑分析

根据输电线路实际运行工况,当突发单相断线故障后,一般可分为简单断线故障和断线再接地故障。根据断线故障后的线路主保护和后备保护判决和动作逻辑,本节详细讨论线路两端距离保护与零序电流保护的具体动作情况。

1.1 简单断线故障保护逻辑分析

假设三相对称的架空线路发生 A 相单相断线故障,且断线后两侧线路均未出现接地情况,输电线路故障模型如图 1 所示。

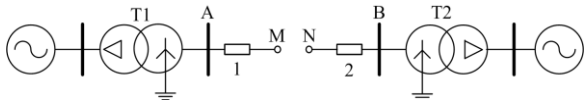


图 1 简单断线故障模型

Fig. 1 Simple disconnection fault model

图中的 1 和 2 代表线路两侧的继电保护装置,本文着重讨论以距离保护作为输电线路的主保护、

零序电流保护作为后备保护的故障特性和保护逻辑。

对于断线相的两侧,设母线 A 一侧为 M 侧,母线 B 一侧为 N 侧。现分析线路 AB 两侧保护的动作情况。

当输电线路 A 相发生简单断线故障后,可以得到断线处的故障边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}_A = 0 \\ \Delta \dot{U}_B = \dot{U}_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{I}_A$ 是断线后 A 相上的电流; $\dot{U}_C$ 和 $\Delta \dot{U}_B$ 是断线处 C 相和 B 相的电压变化。

设线路发生简单断线故障后两侧故障相电流为 $\dot{I}_{MA}$ 、 $\dot{I}_{NA}$, 则 A 相测量阻抗可能变化为

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{\dot{U}_{MA}}{\dot{I}_{MA}} \\ Z_2 = \frac{\dot{U}_{NA}}{\dot{I}_{NA}} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)可知,线路发生简单断线故障后故障相电流 $\dot{I}_{MA}$ 、 $\dot{I}_{NA}$ 接近 0, 则线路两端测量阻抗 Z_1 、 Z_2 趋近无穷大,远大于距离保护动作整定值,因此输电线路两端的距离保护拒动,说明距离保护不能切除输电线路上的简单断线故障^[26-27]。

考虑零序电流保护动作,对式(1)采用对称分量法进行分解,可以得到式(3)。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0 \\ \Delta \dot{U}_1 = \Delta \dot{U}_2 = \Delta \dot{U}_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\dot{I}_0$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 是发生故障后 A 相的零序、正序和负序电流; $\Delta \dot{U}_0$ 、 $\Delta \dot{U}_1$ 、 $\Delta \dot{U}_2$ 则是 A 相的零序、正序和负序电压。由此可以画出输电线路 A 相断线的复合序网图,如图 2 所示。

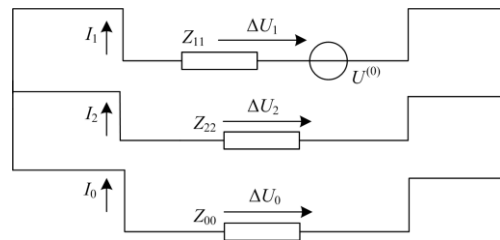


图 2 单相断线故障复合序网

Fig. 2 Composite sequence network with single phase line break fault

根据叠加定理并结合式(3),可以得到输电线路发生 A 相断线的单相断线故障后电流的正序、负序以及零序分量^[28], 计算结果如式(4)所示。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}}{\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}} \cdot \dot{I}_{load} \\ \dot{I}_2 = -\frac{\frac{1}{Z_{22}}}{\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}} \cdot \dot{I}_{load} \\ \dot{I}_0 = -\frac{\frac{1}{Z_{00}}}{\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}}} \cdot \dot{I}_{load} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{I}_{load}$ 是输电线路发生断线故障前 A 相上的负荷电流; Z_{00} 、 Z_{22} 、 Z_{11} 分别代表零序、负序和正序阻抗, 可以看出故障相的负序、正序和零序电流均与故障前的负荷电流有关。

对于三相对称运行的输电线路而言, 零序阻抗大于其他两序阻抗, 根据式(4)可推知断线后的零序电流小于 $\frac{1}{3}\dot{I}_{load}$, 不妨设 $\dot{I}_0 = \frac{1}{4}\dot{I}_{load}$, 理论上只要负荷电流不超过 400 A, 断线后线路的零序电流 $3\dot{I}_0$ 便不会超过 300 A。对在经济输电容量运行下的 220 kV 输电线路而言, 其负荷电流不超过 400 A, 因此断线后的零序电流小于 300 A, 而零序过电流保护的整定值一般取 300 A, 说明输电线路简单断线故障不会引起零序电流保护动作。

综上所述, 当输电线路发生简单断线故障后, 不论是距离保护还是零序电流保护均不能有效判定故障, 无法及时关注或触发相关保护装置动作。

1.2 断线再接地故障保护逻辑分析

输电线路发生单相断线故障后, 断开的线路可能会掉落触地导致接地故障, 这类故障称为断线再接地故障, 现以输电线路出现 A 相断线故障且断线后 M 侧接地为例, 故障模型如图 3 所示。

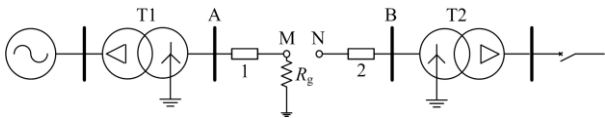


图 3 输电线路断线 M 侧接地故障模型

Fig. 3 M-side grounding fault model of transmission line disconnection

首先分析断线再接地故障的边界条件, 对于 N 侧而言, 线路断线后没有出现接地的情况, 此时 N 侧的故障边界条件仍与式(1)相同。

由于 M 侧的输电线路断线后接地, 可以认为线

路 AM 发生单相接地故障, 因此 M 侧接地处的边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0 \\ \dot{U}_A = \dot{I}_A R_g \end{cases} \quad (5)$$

此时输电线路两侧距离保护的阻抗测量值如式(6)所示^[29]。

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{\dot{I}_{MA} \cdot (R_{am} + R_g)}{\dot{I}_{MA}} = R_{am} + R_g \\ Z_2 = \frac{\dot{U}_{NA}}{\dot{I}_{NA}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_{am} 表示线路阻抗; R_g 表示过渡电阻。线路 N 侧距离保护测量得到的 Z_2 仍接近无穷, N 侧距离保护拒动。线路 M 侧距离保护测量得到的 Z_1 由线路阻抗 R_{am} 与过渡电阻 R_g 组成, 距离保护是否动作与过渡电阻大小相关。

当 R_g 较小, 即阻抗测量值 Z_1 仍小于距离保护整定值时, 保护将会动作切除接地故障, 并且在保护 1 动作后, 保护 2 将相继动作切除断线故障。反之当 R_g 较大时, 阻抗测量值 Z_1 超过距离保护的整定值导致保护 1 拒动, 根据前面分析, 保护 2 同样拒动, 此时距离保护无法切除故障。

当主保护拒动时, 考虑零序电流保护的动作情况。首先用对称分量法对式(6)进行分析可以得到接地侧故障相各序电流和接地点故障相电流。

$$\begin{cases} \dot{I}_k = \frac{3\dot{U}_0}{Z_{k11} + Z_{k22} + Z_{k00} + 3R_g} \\ \dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A0} = \frac{\dot{U}_0}{Z_{k11} + Z_{k22} + Z_{k00} + 3R_g} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\dot{I}_{A2}$ 、 $\dot{I}_{A0}$ 、 $\dot{I}_{A1}$ 分别是短路点的负序、零序、正序电流; $\dot{U}_0$ 是故障点故障前相电压; Z_{k22} 、 Z_{k00} 和 Z_{k11} 分别是接地点看进去的负序、零序和正序阻抗; $\dot{I}_k$ 是接地点故障相电流。

由于正序、零序和负序阻抗值较小, 接地侧零序电流将会激增并超过零序过电流保护的整定值 300 A, 此时由零序电流保护动作切除故障。

根据上述分析可以得出结论: 输电线路发生断线再接地故障后, 输电线路保护的動作情况取决于接地侧过渡电阻的大小。当过渡电阻较小时, 接地侧上的距离保护能够动作并带动对侧保护相继动作进而切除故障; 反之当过渡电阻较大时, 线路两侧的距离保护都将拒动, 此时由零序电流保护动作切除故障。

2 断线故障附加识别判据及保护逻辑整定

2.1 断线故障附加识别判据

通过上节的分析可知,距离保护和零序电流保护无法识别并及时处置断线故障,因此本节讨论在保护中增加断线故障的附加识别判据。

当输电线路发生单相简单断线故障后,由故障边界条件式(1)可知,输电线路两侧故障相的电流均下降并趋于 0,且线路电压变化不明显。据此给出简单断线故障的识别判据为

$$\text{满足} \begin{cases} |i_{M\phi}| < I_{\text{set}} \\ |i_{N\phi}| < I_{\text{set}} \\ I_{\text{set}} < |i_{M\phi}| < I_{\text{act}} \\ I_{\text{set}} < |i_{N\phi}| < I_{\text{act}} \\ |\Delta U| < U_{\text{set}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{\text{dM}} = 1 \\ K_{\text{dN}} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $|i_{M\phi}|$ 和 $|i_{N\phi}|$ 是 M 侧和 N 侧的故障相电流的测量值,而 $|i_{M\phi}|$ 和 $|i_{N\phi}|$ 代表非故障相的测量电流;

I_{set} 代表电流的无流整定值,其值一般取 $5\% I_E$; I_{act} 是过流整定值,其大小取额定值的 120% ; $|\Delta U|$ 则是各相电压故障前后的变化量; U_{set} 为电压变化整定值,取 $5\% U_E$, U_E 和 I_E 分别是线路电压、电流的额定值。上述整定值远小于接地保护判据中的保护定值,说明该判据不会与现有接地保护判据混淆。 K_{dM} 、 K_{dN} 代表线路两侧距离保护,1 代表保护动作。

当重载运行的输电线路发生负荷脱落时,线路各相电流都将出现大幅下降,可能接近无流整定值,同时线路电压明显升高。但线路发生单相断线时只有故障相电流低于无流整定值,且线路电压变化不明显,根据式(8)可以将这两种故障区分。

在线路主保护中增补上述判据,当输电线路上的电流以及电压变化量满足式(8)时,则可以判定输电线路发生了简单断线故障,后续可根据线路实际运行工况和系统可靠性的要求,设定主保护对该类断线故障的选切方案。

2.2 断线再接地故障的识别判据及保护逻辑

针对线路发生断线故障时,线路保护可能在断线故障后拒动或者基于输电可靠性不做选切,经一定时间,该断线故障可能演化为短路接地故障,此时输电线路上的距离保护和零序电流保护都具备故障切除能力。

根据上文的断线故障判据和短路故障判据,可以推导出断线再接地故障的附加识别判据为(设 M

侧接地):

$$t = t_0 \begin{cases} \text{式(8)} \\ K_{\text{dM}} = 0 \\ K_{\text{dN}} = 0 \end{cases} \Rightarrow \text{满足} \begin{cases} |i_{N\phi}| < I_{\text{set}} \\ |i_{M\phi}| > I_{\text{act}} \\ |\Delta U_{M\phi}| > U_{\text{set}} \\ |\Delta U_{N\phi}| < U_{\text{set}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{\text{dM}} = 1 \\ K_{\text{dN}} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $|i_{M\phi}|$ 、 $|i_{N\phi}|$ 为线路两侧故障相的测量电流; I_{set} 、 I_{act} 与式(8)中的一致,大小同样取额定电流的 5% 和 120% ; $|\Delta U_{M\phi}|$ 、 $|\Delta U_{N\phi}|$ 代表线路两侧故障相的电压变化量; U_{set} 和式(8)中的相同,取额定电压的 5% ; K_{dM} 、 K_{dN} 同样代表线路两侧的距离保护,0 代表保护不动作,而 1 代表保护动作。

在输电线路保护中增加判据式(9),当线路在 t_0 时发生断线故障且两侧距离保护没有动作,线路带故障运行至 t_1 时刻,若此时电流和电压变化量满足式(9)则可以确定线路发生了断线再接地故障,并向线路两侧距离保护发出动作信号。

综上所述,新增的断线再接地故障保护逻辑不会影响输电线路现有的保护正常工作,且所提识别判据所需要的电压和电流均可在保护安装处直接获得,无需增加额外的测量设备。

3 测试与验证

3.1 仿真验证

为验证上述方法的可行性和有效性,本节在 PSCAD 软件中构建电力系统输电线路模型进行故障分析与测试。系统的模型如图 4 所示,现将输电

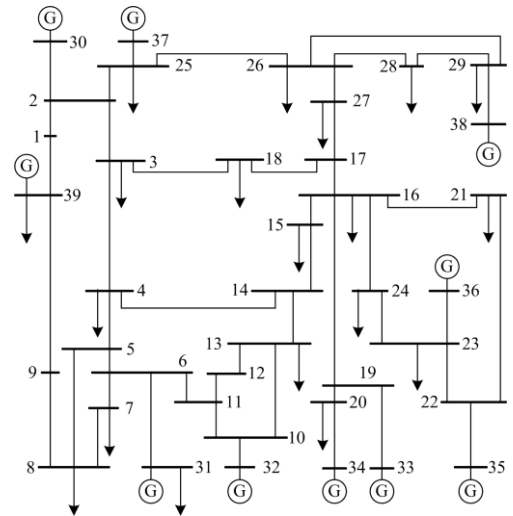


图 4 电力系统输电线路模型图

Fig. 4 Power system transmission line model diagram

线路 L16-19 的电压等级设置为 220 kV, 在该线路上进行断线故障仿真分析。

在 220 kV 输电线路 L16-19 上设置单相简单断线故障, 定义母线 16 一侧为 M 侧, 母线 19 一侧为 N 侧, 故障后线路 L16-19 的各相电流、电压的变化情况如表 1 所示。

表 1 输电线路 L16-19 单相断线后各相电压、电流

Table 1 Voltage and current of each phase of transmission line L16-19 after single phase disconnection

L16-19	$I_a/$	$I_b/$	$I_c/$	$3I_0/$	$\Delta U_a/$	$\Delta U_b/$	$\Delta U_c/$
	A	A	A	A	kV	kV	kV
M 侧	12.45	310.99	302.42	260.01	1.60	1.62	1.33
N 侧	12.60	318.03	304.76	260.07	2.30	1.65	1.25

根据式(8)可以计算 220 kV 输电线路 L16-19 的 I_{set} 、 I_{act} 、 U_{set} , 经过计算其值分别为 17.58 A、425 A 和 11 kV。

通过表 1 可以看出: 输电线路 L16-19 故障后, 在输电线路两侧的距离保护和零序电流保护没有动作的条件下, 线路两侧的 A 相电流均低于无流整定值, 而 B、C 相的电流大于无流整定值小于过流整定值, 符合断线故障识别判据式(8)。此外, 输电线路 L16-19 两侧的电压变化量均未超过整定值 11 kV, 各相电压变化不明显且符合判据式(8), 说明线路发生的是 A 相断线故障, 且故障后零序电流未超过整定值 300 A。该仿真结果可以证实: 本文所提出的简单断线故障识别判据是合理有效的。

另外, 输电过程中由于负荷、潮流变化或者线路故障, 都可能引起输电线路两侧功角的变化, 从而影响断线和短路故障判据的有效性。基于此, 考虑输电线路 L16-19 在不同功角下发生单相断线故障后各相电流、电压以及线路两侧的保护动作情况, 输电线路功角的范围选择 0° 到 70° , 每 10° 为一个间隔, 仿真测试结果如表 2、表 3 所示。

通过对表 2 和表 3 分析可知: 即使输电线路的功角发生变化, 断线后输电线路两侧的故障相电流、非故障相电流以及各相电压的变化量依旧符合断线故障识别判据式(8)。

随着功角的增大, 可以发现断线后的零序电流、非故障相电流逐渐减小, 而保护的動作情况则不受功角变化的影响, 在各角度下均是未动作。上述仿真结果证明所提断线故障识别判据在不同功角下依然有效。

现在输电线路 L16-19 上分别设置过渡电阻为 $5\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 的 A 相单相断线再接地故障, 设置 M 侧

为接地侧, 线路发生故障后各相电压的变化量如表 4 所示。

表 2 不同功角下输电线路发生单相断线故障后的负荷电流和零序电流

Table 2 Current and zero sequence current after disconnection of transmission line under different power angles

功角		I_a/A	I_b/A	I_c/A	$3I_0/A$
0°	M 侧	12.20	320.25	314.45	280.08
	N 侧	13.23	332.20	322.06	280.11
10°	M 侧	12.20	322.91	317.21	274.80
	N 侧	12.34	331.00	321.25	274.83
20°	M 侧	12.20	319.20	313.50	272.13
	N 侧	12.33	327.17	317.46	272.19
30°	M 侧	12.21	315.06	309.37	269.16
	N 侧	12.34	322.90	313.25	269.22
40°	M 侧	12.21	310.13	304.47	265.59
	N 侧	12.35	317.82	308.25	265.74
50°	M 侧	12.21	303.72	298.11	257.94
	N 侧	12.34	311.21	301.76	261.12
60°	M 侧	12.21	294.39	288.85	254.10
	N 侧	12.35	301.58	292.31	254.37
70°	M 侧	12.22	278.28	272.93	242.16
	N 侧	12.33	284.97	276.07	242.55

表 3 不同功角下输电线路发生单相断线故障后的电压变化量及保护动作情况

Table 3 Voltage variation and protection action of single phase line break under different power angles

功角		$\Delta U_a/kV$	$\Delta U_b/kV$	$\Delta U_c/kV$	两侧保护动作情况
0°	M 侧	1.55	1.71	1.41	未动作
	N 侧	2.33	1.75	1.30	未动作
10°	M 侧	0.16	1.77	1.42	未动作
	N 侧	1.14	1.61	1.38	未动作
20°	M 侧	0.05	1.78	1.42	未动作
	N 侧	1.18	1.57	1.34	未动作
30°	M 侧	0.08	1.79	1.41	未动作
	N 侧	1.23	1.54	1.33	未动作
40°	M 侧	0.23	1.81	1.44	未动作
	N 侧	1.27	1.50	1.25	未动作
50°	M 侧	0.41	1.83	1.44	未动作
	N 侧	1.33	1.45	1.19	未动作
60°	M 侧	0.68	1.84	1.47	未动作
	N 侧	1.41	1.36	1.12	未动作
70°	M 侧	1.11	1.87	1.49	未动作
	N 侧	1.52	1.25	0.97	未动作

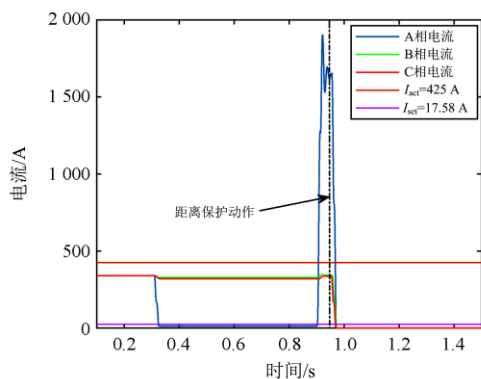
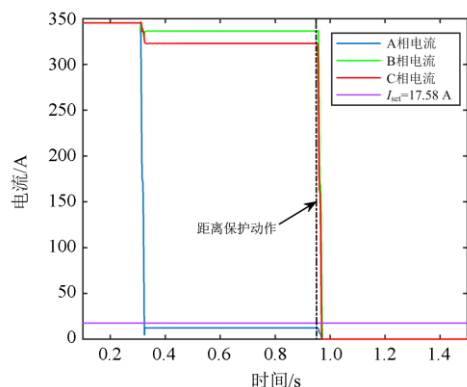
表 4 输电线路 L16-19 断线再接地后各相电压变化

Table 4 Voltage change of each phase after L16-19 line breaking and re grounding				
输电线路 L16-19		$\Delta U_a/\text{kV}$	$\Delta U_b/\text{kV}$	$\Delta U_c/\text{kV}$
过渡电阻 $R_g=5\ \Omega$	M 侧	88.39	0.02	0.01
	N 侧	1.22	2.35	1.62
过渡电阻 $R_g=50\ \Omega$	M 侧	26.05	0.14	0.03
	N 侧	2.28	1.65	1.25

从表 4 可以看出：当过渡电阻为 $5\ \Omega$ 时，线路 L16-19 M 侧 A 相的电压变化量超过了整定值，而 N 侧 A 相的电压变化量小于 $11\ \text{kV}$ ，符合识别判据式(9)中的电压条件。

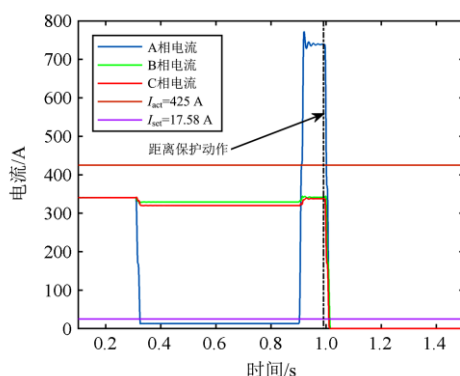
而当过渡电阻增大到 $50\ \Omega$ 后，与 $5\ \Omega$ 的过渡电阻相比，接地侧故障相的电压变化量明显下降但还是超过了 $11\ \text{kV}$ ，而未接地侧故障相的电压变化量仍小于整定值，输电线路两侧电压的变化依旧符合识别判据式(9)。

输电线路 L16-19 发生过渡电阻为 $5\ \Omega$ 的断线再接地故障时输电线路两侧电流的变化情况如图 5、图 6 所示。

图 5 线路 L16-19 M 侧各相电流($R_g=5\ \Omega$)Fig. 5 Current of each phase on L16-19 M side ($R_g=5\ \Omega$)图 6 线路 L16-19 N 侧各相电流($R_g=5\ \Omega$)Fig. 6 Current of each phase on L16-19 N side ($R_g=5\ \Omega$)

从图 5 和图 6 能够发现：输电线路 L16-19 在 $0.3\ \text{s}$ 时发生断线故障，此时两侧的保护均未动作。在约 $0.6\ \text{s}$ 后，断线相的 M 侧发生接地，接地侧的故障相电流超过了过流整定值，未接地侧的故障相电流则低于无流整定值，两侧电流的变化情况均符合式(9)，随后距离保护将故障切除。

当过渡电阻为 $50\ \Omega$ 时，输电线路 L16-19 M 侧的电流变化如图 7 所示，而线路 N 侧的电流变化与图 6 类似。

图 7 线路 L16-19 M 侧各相电流($R_g=50\ \Omega$)Fig. 7 Current of each phase on L16-19 M side ($R_g=50\ \Omega$)

根据图 7 可知：线路 M 侧的 A 相电流在 $0.3\ \text{s}$ 左右突然下降并低于无流整定值，随后 A 相发生接地，A 相电流超过过流整定值。同时由于未接地侧故障相的电流变化与图 6 类似，线路两侧的电流变化依然满足判据式(9)，距离保护在接地发生后不到 $0.1\ \text{s}$ 将故障切除，证明所提判据在过渡电阻较大的情况下依然可以及时切除断线再接地故障。

通过上述仿真分析，证明了本文所提出的故障识别判据及其保护逻辑能够准确识别线路上的断线再接地故障。

3.2 实例分析

本文方法已应用于四川省某二级水电站的一回 $220\ \text{kV}$ 输电线路，该线路投运时间长，地理环境复杂，已多次发生断线故障。该线路全长 $55\ \text{km}$ ，配置有距离保护和零序电流保护，定义该线路靠近水电站的一侧为 M 侧，远离水电站的一侧为 N 侧。

该水电站输电线路发生简单断线故障后，线路两侧各相电流及各相电压的变化量如表 5 所示。该水电站输电线路的 I_{set} 、 I_{act} 和 U_{set} 经过计算分别为 $17.24\ \text{A}$ 、 $414\ \text{A}$ 、 $11\ \text{kV}$ 。

从表 5 可以看出：输电线路发生故障后，线路两侧的 A 相电流均低于无流整定值，同时线路两侧各相电压的变化均在额定值的 5% 以内，符合简单断线故障识别判据式(8)，而后距离保护动作切除故

障, 说明该水电站输电线路具备了识别并及时切除线路上简单断线故障的能力。

表 5 水电站输电线路断线后电压、电流及保护动作情况

Table 5 Voltage, current, and protection action of transmission line of hydropower station after simple disconnection

220 kV 线路	I_a/A	I_b/A	I_c/A	$\Delta U_a/kV$	$\Delta U_b/kV$	$\Delta U_c/kV$	距离保护
M 侧	13.06	333.57	324.65	1.64	1.70	1.36	动作
N 侧	11.02	340.22	327.21	2.19	1.61	1.30	动作

此外该水电站 220 kV 输电线路的继电保护装置还记录了一起单相断线再接地故障, 根据保护记录的数据绘制电流变化图像并记录两侧电压的变化量, 电流变化如图 8、图 9 所示, 输电线路两侧的电压变化情况则如表 6 所示。

根据图 8、图 9 可以得知: 该水电站输电线路在约 0.2 s 左右发生 B 相断线故障, 系统根据当时运行状况没有选择切除故障, 水电站输电线路带故

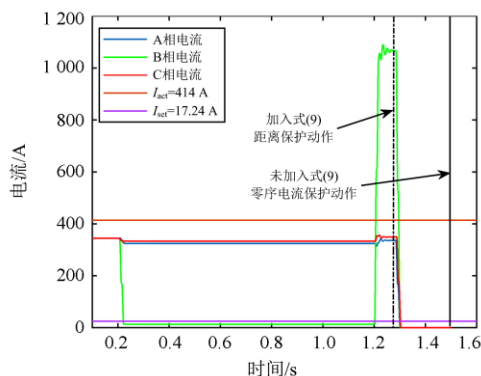


图 8 水电站输电线路断线再接地后 M 侧各相电流

Fig. 8 Current at M side of transmission line of hydropower station after disconnection and re grounding

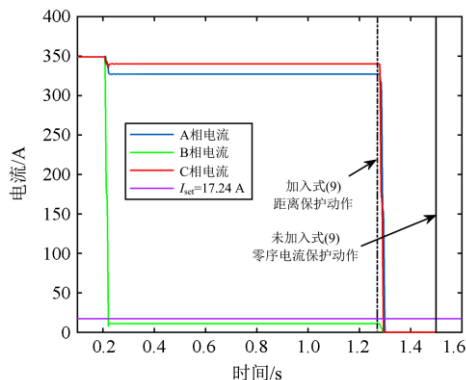


图 9 水电站输电线路断线再接地后 N 侧各相电流

Fig. 9 Current at N side of transmission line of hydropower station after disconnection and re grounding

表 6 水电站 220 kV 线路断线再接地后电压变化

Table 6 Voltage variation of 220 kV transmission line of hydropower station after simple disconnection

220 kV 线路	线路 M 侧保护安装处	线路 N 侧保护安装处
$\Delta U_a/kV$	0.17	1.28
$\Delta U_b/kV$	44.08	2.30
$\Delta U_c/kV$	0.36	1.70

障运行约 1 s 后, 线路 M 侧的 B 相电流超过 1 000 A, 而线路 N 侧的 B 相电流低于无流整定值, 此时线路 B 相 M 侧接地。

从表 6 可以看出: 该水电站 220 kV 输电线路 M 侧的 B 相电压变化量超出整定值, 而 N 侧的电压变化量却在整定值内, 符合判据式(9)中的电压判据, 说明输电线路的 B 相发生了故障。

加入判据前, 故障是由零序电流保护在故障后约 0.3 s 切除, 说明故障时的过渡电阻较大; 而加入判据式(9)后, 系统则能够通过距离保护将故障更快地切除。这证明了该水电站继电保护装置在加入识别判据和保护逻辑后, 能够快速识别并切除线路上的断线再接地故障。

4 结论

本文对输电线路两种类型的断线故障的继电保护逻辑进行了分析, 找出了保护拒动和识别不利的具体原因, 提出并测试验证了一种新的附加保护方法。本文主要结论如下:

1) 输电线路发生简单断线故障后, 由于测量阻抗趋于无穷大且零序电流未达到整定值, 线路两侧的距离保护和零序电流保护均拒动; 而当线路发生断线且一侧接地时, 线路保护是以切除接地故障的方式切除断线再接地故障, 保护的動作情况与过渡电阻大小有关。

2) 根据简单断线故障和断线再接地故障后保护装置的反应, 以及电流、电压的变化特征, 分别制定了简单断线故障、断线再接地故障的附加识别判据, 并进一步完善了断线故障的保护逻辑。

3) 附加判据无需增加额外的保护设备, 能够快速、可靠地识别输电线路上的简单断线故障和断线再接地故障, 且所提判据和保护逻辑不会影响输电线路现有的保护正常工作, 适合应用推广。

参考文献

- [1] ZHOU Luyao, LI Te, YE Jinbiao, et al. Fault analysis and simulation test research on lightning stroke-caused wire-breakage of overhead ground line[C] // 2019 IEEE 3rd International Conference on Circuits, Systems and

- Devices (ICCS), August 23-25, 2019, Chengdu, China: 132-137.
- [2] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 18-26.
- LÜ Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26.
- [3] 王锐, 彭向阳, 梁永纯. 一起因雷击造成的 220 kV 架空地线断线故障分析[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 106-111.
- WANG Rui, PENG Xiangyang, LIANG Yongchun. Analysis of one disconnection fault of 220 kV overhead ground wire caused by lightning stroke[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4): 106-111.
- [4] 黄绪勇, 沈志, 王昕. 云南电网输电线路鸟害故障风险评估方法[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 156-163.
- HUANG Xuyong, SHEN Zhi, WANG Xin. Risk assessment method of bird damages for Yunnan power grid transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 156-163.
- [5] 韩伟, 杨睿璋, 刘超, 等. 混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 179-188.
- HAN Wei, YANG Ruizhang, LIU Chao, et al. DC fault characteristics and fault current suppression strategy of three-terminal hybrid HVDC system based on LCC and hybrid MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 179-188.
- [6] 吴琛, 苏明昕, 谢云云, 等. 基于 BP 神经网络的输电线路雷击故障预测[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 133-139.
- WU Chen, SU Mingxin, XIE Yunyun, et al. BP neural network based lightning fault prediction of transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 133-139.
- [7] 刘云. 同塔并架高压直流输电线路故障及保护特性研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 163-169.
- LIU Yun. Characteristics of fault and protection of the multi HVDC transmission lines on the same tower[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 163-169.
- [8] 陆政君, 范春菊, 赵铎, 等. 不同电压等级同杆双回线断线故障分析方法[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1588-1595.
- LU Zhengjun, FAN Chunju, ZHAO Duo, et al. Disconnection fault analysis method of double circuit transmission line at different voltage levels[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1588-1595.
- [9] 余银钢, 洪新春, 李岭, 等. 基于电力物联网的配电网断线故障识别技术[J]. 电气技术, 2020, 21(7): 76-79.
- YU Yingang, HONG Xinchun, LI Ling, et al. Fault identification technology based on power internet of things[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(7): 76-79.
- [10] 张灿军, 陈梦琦, 张宗熙, 等. 小电阻接地系统单相断线故障电压特征分析[J]. 供用电, 2019, 36(11): 64-70.
- ZHANG Canjun, CHEN Mengqi, ZHANG Zongxi, et al. Analysis of voltage for single-phase break fault voltage in low-resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(11): 64-70.
- [11] KALYUZHNY A. Analysis of temporary over voltages during open-phase faults in distribution networks with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 420-427.
- [12] 薛永端, 陈梦琦, 曹丽丽, 等. 不接地系统单相断线故障电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1322-1333.
- XUE Yongduan, CHEN Mengqi, CAO Lili, et al. Analysis of voltage characteristics of single-phase disconnection fault in ungrounded distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1322-1333.
- [13] ZHANG Qiqi, LIU Siyi, ZHANG Yan. Power distribution network disconnection fault diagnosis using data mining method[C] // 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), May 21-24, 2019, Chengdu, China: 407-411.
- [14] YANG Zengli, ZHANG Kanjun, WANG Yulong, et al. A new backup protection for transmission lines based on substation-area current information[C] // 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 30-November 1, 2020, Wuhan, China: 2347-2352.
- [15] FAN Shixiong, LIU Xingwei, WANG Yanpin, et al. Power grid line breaking identification method based on parallel power flow figure using deep learning[C] // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), September 20-23, 2020, Nanjing, China: 1-5.
- [16] 余伟, 马艳, 毛德拥. 输电线路单相断线时保护行为分析及对策[J]. 安徽电力, 2011, 28(1): 16-17, 54.
- YU Wei, MA Yan, MAO Deyong. Behavior analysis and countermeasures of protection in transmission line with single-phase line breaking[J]. Anhui Electric Power, 2011, 28(1): 16-17, 54.
- [17] 康奇豹, 丛伟, 盛亚如, 等. 配电线路单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 127-136.
- KANG Qibao, CONG Wei, SHENG Yaru, et al. Protection methods of single-phase broken-line fault for

- distribution line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 127-136.
- [18] 王成楷, 洪志章. 基于线电压判据的配电网单相断线故障定位方法[J]. 电气技术, 2017(5): 51-57.
WANG Chengkai, HONG Zhizhang. Line voltage analysis and fault location simulation of single-phase line break fault in distribution network[J]. Electrical Engineering, 2017(5): 51-57.
- [19] GUO Cheng, WANG Hanlin. An adaptive adjustment solution for single-phase line break fault in low-voltage distribution network[C] // 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), March 26-29, 2021, Chengdu, China: 800-804.
- [20] 孟祥忠, 陈文聪, 李金宝. 中压配电网单相断线故障检测及定位的研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(6): 32-37.
MENG Xiangzhong, CHEN Wencong, LI Jinbao. Research on fault detection and location of single line breakage in medium voltage distribution network[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(6): 32-37.
- [21] 常仲学, 宋国兵, 王晓卫. 基于零序电压幅值差的配电网断线识别与隔离[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 135-139.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Xiaowei. Identification and isolation of line breakage fault in distribution network based on zero sequence voltage amplitude differential principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 135-139.
- [22] 王开科, 熊小伏, 肖扬, 等. 基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 10-18.
WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, et al. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 10-18.
- [23] 杜雪, 欧阳金鑫, 龙晓轩, 等. 基于分布式电源电流变化率的主动配电网单相断线保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 41-48.
DU Xue, OUYANG Jinxin, LONG Xiaoxuan, et al. A protection method of a single-phase break fault for an active distribution network based on current change rates of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 41-48.
- [24] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123.
- [25] 刘健, 张志华, 王毅钊. 基于电压信息的配电网断线故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 123-131.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WANG Yizhao. Voltage information based line-broken fault location for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 123-131.
- [26] 卢正飞, 朱可凡, 刘子俊, 等. 基于电压降落比较的高压架空线路断线保护原理[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 9-13, 55.
LU Zhengfei, ZHU Kefan, LIU Zijun, et al. High-voltage overhead line breakage protection based on voltage drop comparison[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 9-13, 55.
- [27] 卢正飞, 张晓宇, 黄福全, 等. 基于计算电流相量的架空线路断线故障识别方法[J]. 浙江电力, 2018, 37(12): 52-56.
LU Zhengfei, ZHANG Xiaoyu, HUANG Fuquan, et al. A breakage fault identification method of overhead lines based on calculated current phasor[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 52-56.
- [28] 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.
- [29] 许志武, 周学明, 毕如玉, 等. 输电线路单相接地故障过渡电阻研究[J]. 湖北电力, 2020, 44(2): 27-32.
XU Zhiwu, ZHOU Xueming, BI Ruyu, et al. Study on transition resistance of single phase grounding fault in transmission line[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(2): 27-32.

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-07-11

作者简介:

陈 军(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 971950822@qq.com

隋佳阔(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: 1332101723@qq.com

易建波(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析及故障诊断. E-mail: jimbo_yi@uestc.edu.cn

(编辑 葛艳娜)