

小电阻接地系统高灵敏性零序电流保护

李海锋,陈嘉权,曾德辉,梁远升,王 钢
(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要:对小电阻接地系统的零序电压、电流关系进行分析,发现发生高阻接地故障时母线零序电压与故障线路零序电流存在比例关系,则零序电压可间接反映过渡电阻的大小,由此提出一种基于零序电压幅值修正的高灵敏性零序电流保护方案。该方案结合现有的零序电流保护原理,通过引入零序电压信息对零序电流测量值进行修正,各线路修正后的零序电流测量值与故障线路首端发生金属性接地故障时的情况相似,保护动作整定值与现有的阶段式零序电流保护相同,从而大幅提高保护在高阻接地故障时的灵敏性。结合工程实际因素,讨论了各参数的整定原则。基于 PSCAD/EMTDC 的仿真和基于 RTDS 的装置测试验证了所提保护方案的有效性,其可将保护耐受过渡电阻能力提高到 1 000 Ω 左右。

关键词:小电阻接地系统;高阻接地故障;零序电流保护;继电保护

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.029

0 引言

随着城市的快速发展,城市用地日益紧张,电缆线路在配电网中所占的比例也日渐增大。相较于消弧线圈接地方式,小电阻接地方式具有能够有效限制弧光接地过电压以及可及时切除故障线路等众多优点^[1],更适用于电缆居多的大中型城市配电网,比如:北京、上海、深圳的配电网均部分采用了小电阻接地方式^[2],广州供电局更是全部采用小电阻接地方式^[2],广东电网也逐步将其 10 kV 配电网全部改小小电阻接地方式。然而,由于配电网馈线所处的环境复杂,容易发生单相经高阻接地故障,其过渡电阻可达上千欧,如广州配电网发生的一例高阻接地故障中,实测的接地电阻高达 1 000 Ω^[3]。目前针对馈线单相接地故障主要采用阶段式零序电流保护方案,而高阻接地故障主要依靠零序Ⅱ段动作,但是为了躲开区外故障时流过本线路的对地电容电流值^[3],其对于区内经过渡电阻的接地故障灵敏性较差,可耐受的过渡电阻值一般为 100 Ω 左右,无法切除高阻接地故障。虽然高阻接地故障的故障电流较小,但若任其长期存在,势必会对设备的绝缘造成很大的威胁,继而引发诸如相间故障等更为严重的故障,扩大故障范围;同时,故障点的过电压以及电弧产生的高温都会造成人身安全问题,所以高阻接地故障的危害不容忽视。

单相高阻接地故障由于故障电流小,且类型复杂多样,接地电阻可能是线性的也可能是非线性的,所以一直以来是配电网难以解决的实际工程问题,吸引了众多学者的关注和研究。然而目前大部分研

究都是针对小电流接地系统,其原理主要集中在利用谐波或者暂态能量方面^[4-7]。由于接地回路存在本质差异,这些方法是否适用于小电阻接地系统尚不明确,而具体针对小电阻接地系统的研究则较少。

文献[8-9]对高阻接地故障的非线性特征进行研究,并提取其时域故障特征。其中,文献[8]提出了一种利用伏安特性反映故障电阻非线性特征的检测算法,但是无法识别非线性特征不明显的故障。文献[9]通过观察零序电流的波形,提出了一种基于波形凹凸性的检测算法,但其会受各种噪声的影响。由于基于暂态量的算法较为复杂,且可靠性不高,而基于稳态量的算法无疑是一种更具有实际工程意义的方法。目前也有采用零序功率方向保护元件的工程案例,但是其极性校验困难,且效果并不理想^[10]。文献[11]根据保护安装处零序电流幅值与零序电压幅值成正比的关系,引入零序电压作为制动量,提出了一种比率制动的算法,但其定值整定较为复杂。另外,目前大部分研究只限于理论分析,其工程实用性还有待检验。

为此,本文同样利用零序电压可以反映过渡电阻大小的思路,在分析过渡电阻对小电阻接地系统各零序分量的影响及其相互关系的基础上,提出了一种基于零序电压幅值修正的高灵敏性零序电流保护方案。通过仿真验证了本文方法的有效性,并利用 RTDS 对保护装置进行了数字动模仿真测试。

1 单相接地故障特征分析

图 1 为小电阻接地系统单相接地故障的示意图。图中,接地小电阻 R_g 接在曲折变压器的中性点上;N 表示非故障线路;F 表示故障线路;假设故障相为 A 相,故障点 P 带有过渡电阻 R_f 。

假设网络中各元件参数均为三相对称,则各序分量具有独立性。利用叠加定理并结合对称分量法

收稿日期:2017-07-25;修回日期:2018-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477057)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477057)

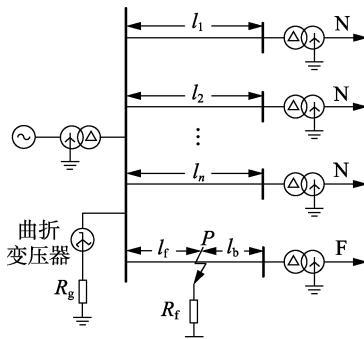


图1 小电阻接地系统单相接地故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-phase-to-ground fault in low-resistance grounding system

可得故障点零序电流为:

$$I_{fa0} = \frac{-U_{fa}}{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3R_f} \quad (1)$$

其中, U_{fa} 为故障点 P 正常运行时的 A 相电压; Z_+ 、 Z_- 、 Z_0 分别为从故障点 P 端口看进去的正、负、零序等效阻抗。

由于故障点到母线处的线路阻抗对稳态计算影响较大,而非故障线路以及故障点后的线路阻抗主要影响暂态过程,所以可忽略其影响,只保留故障点到母线处的线路阻抗。根据图 1 可以得到小电阻接地系统零序网络,如图 2 所示。图中, C_1 、 C_2 、 \dots 、 C_n 分别为各非故障线路的对地电容; C_f 和 C_b 分别为故障点前、后的线路对地电容; L_g 为曲折变压器的零序电感; Z_{Lf0} 为故障点到母线的线路零序阻抗; U_{fa0} 为故障端口的零序等效电压源,其包含了过渡电阻的压降。由此可得零序等效阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_0 &= (Z_p + Z_{Lf0}) // Z_q \\ Z_p &= Z_{zig} // \{1 / [\omega(C_{N\Sigma} + C_f/2)]\} \\ Z_q &= 1 / [\omega(C_f/2 + C_b)] \\ Z_{zig} &= 3R_g + j\omega L_g \end{aligned} \quad (2)$$

其中, Z_{zig} 为曲折变压器支路阻抗; $C_{N\Sigma}$ 为健全线路对地电容之和。

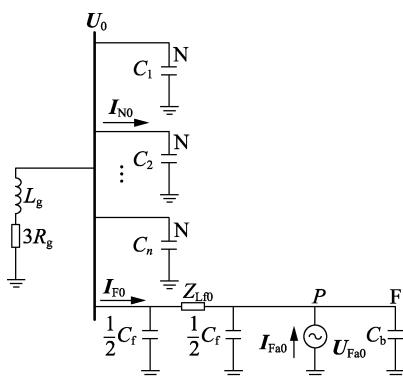


图2 小电阻接地系统零序网络

Fig.2 Zero-sequence network of low-resistance grounding system

1.1 故障线路零序电流分析

由零序网络可得故障线路零序电流 I_{f0} 与故障点零序电流 I_{fa0} 的关系为:

$$I_{f0} = -\frac{j\omega C_{N\Sigma} Z_{zig} + 1}{j\omega(C_{N\Sigma} + C_f/2) Z_{zig} + 1} \frac{Z_q}{Z_p + Z_q + Z_{Lf0}} I_{fa0} = b I_{fa0} \quad (3)$$

其中, b 为比例系数。

为了简化分析,认为正、负序等效阻抗相等,且由于系统阻抗与主变漏抗之和比负载阻抗小得多,可进一步忽略负载阻抗。考虑到线路对地容抗远大于系统阻抗与主变压器漏抗之和,所以可近似有: $Z_+ = Z_- \approx j\omega L_1 + Z_{Lf+}$ (L_1 为换算到 10 kV 侧的系统等效电感和主变漏感之和, Z_{Lf+} 为故障点到母线的线路正序阻抗); 而考虑对地容抗也远大于曲折变压器支路阻抗,则有 $Z_0 \approx 3R_g + j\omega L_g + Z_{Lf0}$ 。综上可得 $|b| \approx 1$, 即故障线路零序电流与故障点零序电流的大小近似相等。则联立式(1)–(3)可得:

$$I_{f0} \approx \frac{U_{fa}}{|3(R_g + R_f) + j\omega(2L_1 + L_g) + 2Z_{Lf+} + Z_{Lf0}|} \quad (4)$$

其中, I_{f0} 、 U_{fa} 分别为 I_{f0} 、 U_{fa} 的大小。

可见,由于 L_1 、 L_g 、 Z_{Lf+} 和 Z_{Lf0} 都较小,而 R_g 一般为 10 Ω 或 12 Ω,当过渡电阻 R_f 较小时,单相接地故障下的零序电流 I_{f0} 将较大,即故障线路具有明显的故障特征,这是小电阻接地系统的优点之一。但是随着过渡电阻 R_f 的增大, I_{f0} 将迅速地减小。不妨进行简单估算:取 R_g 为 10 Ω,忽略 L_1 、 L_g 、 Z_{Lf+} 和 Z_{Lf0} ,当过渡电阻为 100 Ω 时,故障线路零序电流将小于 20 A,此时现有的零序电流保护已经无法动作。

1.2 母线零序电压分析

结合零序网络和式(3)可得母线零序电压为:

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{Z_p Z_q}{Z_p + Z_q + Z_{Lf0}} I_{fa0} = \frac{Z_p Z_q}{Z_p + Z_q + Z_{Lf0}} \frac{I_{f0}}{b} = \\ &\quad -\frac{Z_p Z_q}{Z_p + Z_q + Z_{Lf0}} \frac{U_{fa}}{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3R_f} \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可见,母线零序电压与故障线路零序电流成正比,即 U_0 的大小 U_0 与 I_{f0} 随过渡电阻的增大会同比例地减少^[11],故可以通过 U_0 来反映过渡电阻的大小。若将母线零序电压作为修正量,对测量所得的零序电流进行修正,即可大幅减弱过渡电阻的影响,具体推导如下。

首先对式(1)两端同时进行如下变换:

$$\frac{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3R_f}{Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}} I_{fa0} = \frac{-U_{fa}}{Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可得:

$$\frac{-U_{fa} Z_p Z_q}{U_0 (Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}) (Z_p + Z_q + Z_{Lf0})} I_{fa0} = \frac{-U_{fa}}{Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}} \quad (7)$$

其中, Z_{+h} 、 Z_{-h} 、 Z_{0h} 分别为线路首端故障时对应的正序、负序、零序等效阻抗。

显然式(7)的右边为发生金属性接地故障时的零序电流表达式。因此进一步考虑到式(3)的关系,可以构造如下修正系数:

$$k = \frac{-U_{pN}Z_{0h}}{U_0(Z_{+h}+Z_{-h}+Z_{0h})} \quad (8)$$

其中, U_{pN} 为母线相电压。利用该修正系数对故障线路和非故障线路的零序电流进行修正,则有:

$$I'_{FO} = kI_{FO} = \frac{-b_h U_{pN}}{Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}} \quad (9)$$

$$I'_{i0} = kI_{i0} = \frac{-U_{pN}Z_{0h}}{Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}} j\omega C_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中, b_h 为故障线路首端发生故障时对应的比例系数; C_i 为第 i 回非故障线路的对地电容。

由式(9)和(10)可见,对于经过渡电阻接地故障,经过上述修正后,故障线路零序电流以及各非故障线路的零序电流均与故障线路首端发生金属性接地故障时的情况完全相同,即不再受过渡电阻的影响。以此为基础,本文提出一种基于零序电压幅值修正的高灵敏性馈线零序电流保护。

2 高灵敏性零序电流保护

2.1 基本原理

现有的零序电流保护在过渡电阻较小时具有可靠性高的优点,其保护动作整定值的物理意义明确。因此,可以在保持现有的馈线零序电流保护整定值的基础上,对测量所得的零序电流进行如下修正:

$$I'_0 = KI_0 \quad I_0 > I_{0.unb} \quad (11)$$

$$K = \frac{U_{IN}}{\sqrt{3}U_0} \frac{|Z_{0h}|}{|Z_{+h} + Z_{-h} + Z_{0h}|} \quad (12)$$

其中, $I_{0.unb}$ 为零序电流互感器可能出现的最大不平衡值,其与零序电流互感器的传变特性以及系统不对称运行时出现的不平衡电流有关; K 为修正系数; U_{IN} 为母线额定线电压。

由于零序等效阻抗比正序、负序等效阻抗大得多,所以 K 受系统运行方式的影响较小。在实际计算中,修正系数可以采用近似参数进行计算,即 Z_{+h} 和 Z_{-h} 只考虑 10 kV 侧的系统等效感抗与主变漏抗之和,其中系统等效感抗可考虑最小运行方式下的值,而 Z_{0h} 只考虑曲折变压器支路阻抗,此时有:

$$K' = \frac{U_{IN}}{\sqrt{3}U_0} \sqrt{\frac{(3R_g)^2 + (\omega L_g)^2}{(3R_g)^2 + (\omega L_g + 2\omega L_1)^2}} \quad (13)$$

进一步考虑到正负序等效阻抗远小于零序等效阻抗,则修正系数可简化为:

$$\tilde{K} = \frac{U_{IN}}{\sqrt{3}U_0} \quad (14)$$

以图 1 所示系统(具体参数见附录)为例对各修正系数进行定量分析。图 3 为单相接地故障时,修正系数 K 以及其近似值 K' 和 \tilde{K} 随过渡电阻 R_f 的变化曲线。由图可见,修正系数 K 会随着过渡电阻的增大而增大,以达到自适应的效果,而采用近似参数的 K' 略小于 K 。修正系数简化值 \tilde{K} 虽略大于 K ,且随着过渡电阻的增大这种趋势愈发明显,但整体来看,两者十分相近,其最大相对误差小于 0.5%,而且相对于 K 和 K' , \tilde{K} 的计算更为简单,即使在正序、负序、零序等效阻抗未知的情况下仍能较好地实现修正效果,故更具有实用性。为此,考虑一定的可靠系数可得实用型修正系数为:

$$K'' = \frac{U_{IN}}{\sqrt{3}U_0 k''_{rel}} \quad (15)$$

其中, k''_{rel} 为可靠系数,可取 1.01~1.05。

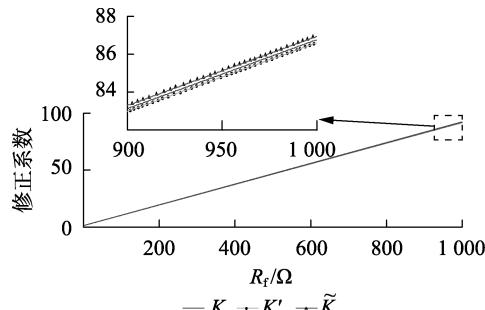


图 3 修正系数变化曲线

Fig.3 Varying curve of correction coefficient

由前文的分析可得,修正后的故障线路零序电流以及各非故障线路零序电流均与故障线路首端发生金属性接地故障时的情况相同,所以现有的保护动作整定值仍有效,从而提高了保护对高阻接地故障的灵敏性。

2.2 保护算法流程图

图 4 为本文所提的高灵敏性零序电流保护的算法流程图。图中,为了与实际工程习惯相配合,零序分量均为 3 倍零序值,后同; $3I_{0.set}$ 为高灵敏性馈线零序电流保护动作整定值; $3U_{0.set}$ 为设置的零序电压下限值,用于防止测量所得的零序电压过小导致保护误动作,其与电压互感器以及系统不对称程度有关; $T_{L.set}$ 为计时设定值。

2.3 整定原则

本文所提的高灵敏性零序电流保护算法中有 4 个参数需要整定,下面分别对其设置原则进行讨论。

a. 零序电流保护动作整定值 $3I_{0.set}$

$3I_{0.set}$ 按照现有的馈线零序电流保护的整定原则进行整定,其要躲开区外故障时本线路流过的电容电流值,即:

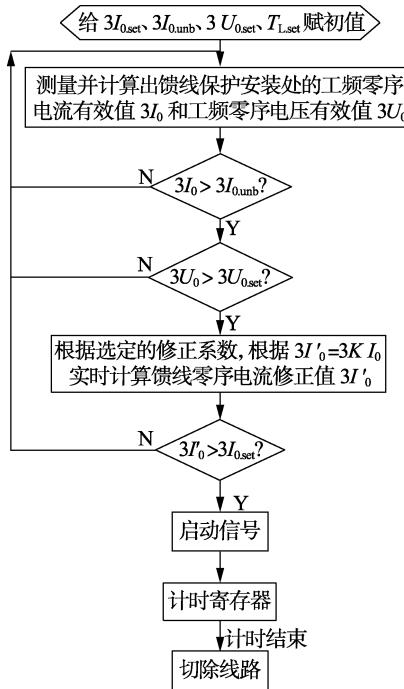


图4 高灵敏性零序电流保护算法流程图

Fig.4 Flowchart of high sensitive zero-sequence current protection algorithm

$$3I_{0,sel} = K_{rel} I_C l \quad (16)$$

其中, K_{rel} 为可靠系数, 一般取 1.5~2.0; I_C 为单位长度对地电容电流, 按照工程惯例, 一般取为 2 A/km; l 为线路长度。

b. 零序电压下限值 $3U_{0,sel}$ 。

$3U_{0,sel}$ 的取值需要考虑系统正常运行状态下的不平衡电压问题。图 5 为小电阻接地系统正常运行时的简化示意图。由图可得小电阻接地系统正常运行下的中性点电压为:

$$U_N = K_c E_A \frac{j\omega(C_A + C_B + C_C)}{j\omega(C_A + C_B + C_C) + 1/R_g} \quad (17)$$

$$K_c = \frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (18)$$

其中, K_c 为系统全部出线的不对称度; α 为位移因子, $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

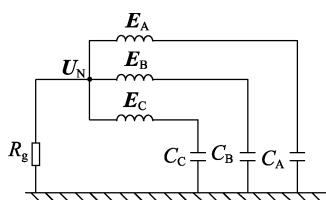


图5 小电阻接地系统正常运行简化示意图

Fig.5 Simplified schematic diagram of low-resistance grounding system under normal operation

架空线路中, K_c 的大小通常为 0.5%~1.5%, 偶尔有大于等于 2.5% 的情况; 电缆线路中, K_c 的大小约为 0.2%~0.5%^[12]。一般情况下, 10 kV 线路的供

电半径在 15 km 以内。假设系统线路总长为 105 km (带 7 条 15 km 馈线), 则 $\omega(C_A + C_B + C_C)$ 为 0.036 6 S (C_A 、 C_B 、 C_C 取值参见附录中表 A1 的零序电容参数), 考虑到 K_c 的大小取为 2.5% 以及 $R_g = 12 \Omega$, 则由式(17)可计算得 U_N 的大小为 58 V, 即系统在正常运行状态下的最大不平衡电压 $3U_0$ 为 174 V。

现场采集母线零序电压一般采用电压互感器的开口三角绕组, 而正常运行时开口三角绕组的不平衡电压 $3U_0$ 约为 1 V^[13], 换算至一次侧即为 174 V 左右, 与上述计算结果相同, 所以建议 $3U_{0,sel}$ 取 174 V。

c. 零序电流互感器最大不平衡值 $3I_{0,unb}$ 。

$3I_{0,unb}$ 的取值需要考虑系统不对称运行工况下可能出现的不平衡电流、线路参数不平衡以及零序电流互感器传变特性等问题。现场采集零序电流的方式有 2 种:一种是通过专用的零序电流互感器采集, 另一种则是通过采集三相电流然后经信号处理后得到。由于相电流互感器的变比较大, 且三相电流互感器间的传变特性难免存在一定的差异, 所以由相电流互感器采集得到的零序电流一般误差较大, 不太适用于高阻检测这种对零序电流测量精度要求较高的场合, 而专用零序电流互感器的测量精度高, 且在不对称运行工况下的不平衡值也相对较小, 所以建议使用专用零序电流互感器。

由前文的计算可得小电阻接地系统的最大不对称度大小 $|P_{asy}|$ 为 1%, 则由图 5 可得线路的不平衡电流为:

$$3I_{unb} = (K_i + P_{asy}) j\omega(C_A + C_B + C_C) E_A \quad (19)$$

其中, K_i 为第 i 条线路的不对称度。考虑线路最长为 30 km, 对地电容电流为 2 A/km, 其不对称度大小 $|K_i|$ 取为 2.5%, 且 K_i 与 P_{asy} 同向, 则可得最大不平衡电流为 2.1 A。考虑到可靠度为 2, 建议 $3I_{0,unb}$ 取为 4.2 A。

d. 计时设定值 $T_{L,sel}$ 。

$T_{L,sel}$ 的取值需要考虑保护之间的配合问题, 本文所提保护算法用作后备保护时, 可与现有的零序过流 I 段相配合, 其延时值可与现有的零序过流 II 段相同, 无需重新设定。

3 仿真分析

仿真所采用的 10 kV 小电阻接地系统如图 1 所示, 其中曲折变压器按照其原理结构搭建了相应的 PSCAD 模型^[14], 4 条电缆馈线按照其尺寸结构^[15]搭建了相对应的频变模型, 电气参数见附录中的表 A1。

故障点设置在长度为 12 km 的馈线 3 末端, 故障类型分别为经线性过渡电阻接地故障和电弧接地故障。以馈线 1 和 3 的保护动作情况作为观察样

本,根据式(10)并考虑可靠系数 $K_{\text{rel}} = 1.5$,可计算得馈线1和3的保护动作整定值分别为18 A、36 A。采用实用型修正系数 K'' 时, k''_{rel} 取为1.03。保护算法中其他参数设置为: $3I_{0,\text{umb}} = 4.2$ A, $3U_{0,\text{set}} = 174$ V。表1为经线性过渡电阻接地故障的仿真计算结果,其所对应的线路首端发生金属性接地故障时故障线路和非故障线路(馈线1)的零序电流($3I_0$)的仿真值分别为549.3 A和12.52 A。

表1 经线性过渡电阻接地故障的仿真结果及保护动作情况

Table 1 Simulative results and protection operation of grounding fault with linear transition resistance

馈线	R_f/Ω	仿真值		$3I_0$ 修正值/A		保护动作情况
		$3I_0/A$	$3U_0/V$	采用 K'	采用 K''	
1(非故障 线路)	0	7.911 0	1 131.0	12.01	11.77	不动作
	500	0.255 2	364.8	—	—	不动作
	1 000	0.129 1	184.6	—	—	不动作
3(故障 线路)	1 200	0.107 7	154.1	—	—	不动作
	0	347.200	1 131.0	526.8	516.2	动作
	500	11.200	364.8	526.8	516.2	动作
	1 000	5.667	184.6	526.9	516.3	动作
	1 200	4.731	154.1	—	—	不动作

电弧接地故障的形式为一线性电阻 R_f 和非线性电弧电阻 R_{arc} 相串联。电弧模型采用控制论电弧模型,其为 Mayr 电弧模型的改进版,电弧方程如下:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{T}(G-g) \quad (20)$$

$$T = \frac{\beta i_m}{l_{\text{arc}}}, G = \frac{|i_{\text{arc}}|}{V_p l_{\text{arc}}} \quad (21)$$

其中, g 为电弧电导; T 为时间常数; G 为电弧稳定电导; β 为比例系数; i_m 为电弧电流峰值; l_{arc} 为弧长; i_{arc} 为电弧电流; V_p 为平均稳态电压梯度。

本文仿真中,控制论电弧模型的参数设置为: $\beta = 2.85 \times 10^{-5}$; i_m 近似取电弧故障点直接接地时的电流峰值^[16];起始电导 $g_0 = 1 000$ S; 弧长 l_{arc} 统一设置为20 cm; 平均稳态电压梯度 V_p 在电弧电流为1.4~24 kA时,一般取为15 V/cm^[17],但由于配电网发生单相接地故障时的电弧电流较小,而发生高阻接地故障时更小,所以本文仿真中 $V_p = 17$ V/cm。表2为电弧接地故障仿真结果。

上述仿真结果表明,本文所提保护方案对2种故障均能正确动作,且采用2种不同修正系数 K' 、 K'' 后的修正效果与前文分析一致。可见,本文所提保护方案通过引入零序电压幅值对零序电流测量值进行修正,修正后的零序电流略小于故障线路首端发

生金属性接地故障时的零序电流。与现有的馈线零序电流保护相比,本文所提保护方案大幅提高了保护可耐受的过渡电阻值(如在本算例中可耐受1 000 Ω的过渡电阻)。

表2 电弧接地故障的仿真结果及保护动作情况

Table 2 Simulative results and protection operation of arc fault

馈线	R_f/Ω	仿真值		$3I_0$ 修正值/A		保护动作情况
		$3I_0/A$	$3U_0/V$	采用 K'	采用 K''	
1(非故障 线路)	0	7.496 0	1 074.0	11.97	11.73	不动作
	500	0.242 1	344.6	—	—	不动作
	1 000	0.122 6	174.5	—	—	不动作
	1 200	0.102 4	145.7	—	—	不动作
3(故障 线路)	0	329.800	1 074.0	526.8	516.2	动作
	500	10.580	344.6	526.9	516.3	动作
	1 000	5.357	174.5	526.9	516.3	动作
	1 200	4.473	145.7	—	—	不动作

大量仿真实验结果证明,选取不同的故障时刻、不同的故障点以及改变系统参数的情况下,本文所提保护方案均能正确动作。

4 基于 RTDS 的保护装置测试

4.1 高灵敏性零序电流保护功能实现

本次测试采用的保护装置是一台由本实验室团队研制的馈线测控保护一体化装置,其采用模块化设计,选用 TI 公司的 OMAP-L138 双核(DSP+ARM)处理器,可充分满足工业应用的高能效以及低功耗需求;该装置配置有大容量的 RAM 和高精度的 AD 转换芯片(AD7606);该装置保护程序中的保护逻辑包含各种保护元件,且各元件可独立投退。装置的详细参数可参见文献[18],本文不再赘述。

在该测试用保护装置的零序电流保护元件中嵌入本文所提出的高灵敏性零序电流保护功能。投入高灵敏性零序电流保护元件后,设定不平衡电流值 $I_{\text{OSET_unb}}$ 、零序电压下限值 U_{OSET} ,当零序电流大于不平衡电流值且零序电压大于下限值时,对零序电流测量值进行修正,若修正值大于动作整定值,则发出跳闸信号并输出故障报告。图6为高灵敏性零序电流保护逻辑图。

4.2 RTDS 装置测试

搭建第3节所述小电阻接地系统相应的 RTDS 模型,其中电压、电流互感器分别参考实际的10 kV 电压、电流互感器的参数进行设置。保护装置设置在馈线3上,故障点设置在线路末端,通过不断增大线性过渡电阻值直至保护不动作,对现有的零序电

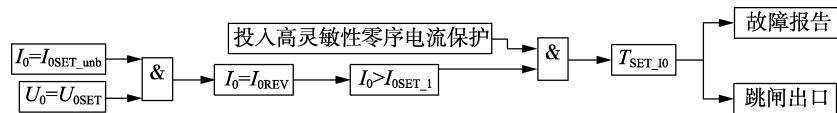


图6 高灵敏性零序电流保护逻辑图

Fig.6 Logic diagram of high sensitive zero-sequence current protection

流保护以及本文提出的高灵敏性零序电流保护进行装置测试。在本次测试中,修正系数只采用了实用型修正系数 K'' ,且由于装置二次侧零序电流准确测量范围的最小值为0.1 A(一次侧为5 A),所以 $3I_{0,\text{unb}}=5$ A,其他参数设置同第3节,测试结果如图7所示。

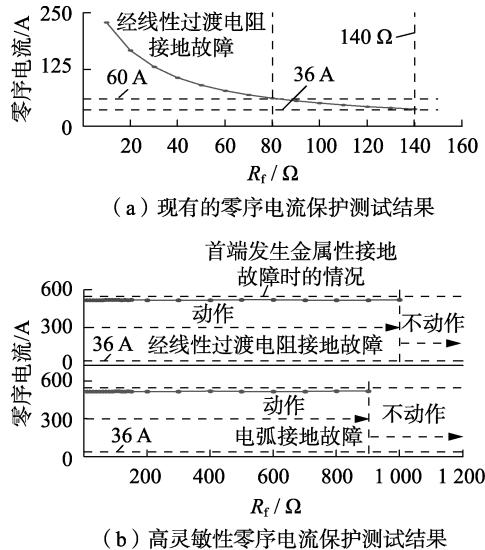


图7 基于RTDS的保护装置测试结果

Fig.7 Testing results of protection device based on RTDS

由图7可见,现有的零序电流保护若按线长整定,在本算例中可耐受的过渡电阻约为140 Ω,若按工程惯例统一设置为60 A^[1-2]时其值更小,而本文提出的高灵敏性零序电流保护在发生经线性过渡电阻接地故障和电弧接地故障时均能正确动作,而且可耐受过渡电阻值可达1 000 Ω左右,极大地提高了保护对单相高阻接地故障的灵敏性,提高了配电网的安全稳定性。

5 结论

针对小电阻接地系统中现有的零序电流保护无法对单相高阻接地故障动作的现象,本文通过分析零序分量间的相互关系,发现母线零序电压与故障线路零序电流成正比,其可反映过渡电阻的大小,由此提出了一种高灵敏性零序电流保护。本文所提的保护方案结合了现有零序电流保护的优点,通过引入零序电压幅值信息对零序电流测量值进行修正,修正后各线路的零序电流与故障线路首端发生金属性接地故障时的情况相似,极大地提高了保护可耐受过渡电阻能力。基于PSCAD/EMTDC的仿真验证和基于RTDS的装置测试表明,本文所提保护方案物理意义明确,保护动作定值可沿用原有的阶段式零序电流保护整定原则,可将保护耐受过渡电阻能力提高到1 000 Ω左右;且算法基于工频量,易于实现,具有很好的工程应用前景。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张新明. 10 kV小电阻接地系统运行方式分析与探讨[J]. 电气技术,2011(7):82-84.
ZHANG Xinming. Analysis and discussion on operation of 10 kV small resistance grounding system[J]. Electrical Engineering, 2011 (7):80-84.
- [2] 刘育权,蔡燕春,邓国豪,等. 小电阻接地方式配电系统的运行与保护[J]. 供用电,2015,32(6):30-35.
LIU Yuquan, CAI Yanchun, DENG Guohao, et al. Operation and protection in distribution system with small resistance grounding mode[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(6):30-35.
- [3] 江文东. 10 kV小电阻接地系统零序过流定值的探讨[J]. 电力自动化设备,2002,22(10):73-75.
JIANG Wendong. Discussion on zero sequence overcurrent settings for 10 kV low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10):73-75.
- [4] SOHEILI A, SADEH S J, LOMEI H, et al. A new high impedance fault detection scheme: Fourier based approach [C] // 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWER-CON). Wollongong, NSW, Australia: IEEE, 2016: 1-6.
- [5] SANTOS W C, LOPES F V, BRITO N S D, et al. High-impedance fault identification on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):23-32.
- [6] SAMANTARAY S R, PANIGRAHI B K, DASH P K. High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(2):261-270.
- [7] 李震球,王时胜,吴丽娜,等. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及仿真[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):44-49.
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina, et al. A new method and simulation for arcing high impedance grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17):44-49.
- [8] 王宾,耿建昭,董新洲. 配网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3815-3823.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (22) : 3815-3823.
- [9] 耿建昭,王宾,董新洲,等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):85-91.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16):85-91.
- [10] 许庆强,许扬,周栋骥,等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):91-94,115.
XU Qingqiang, XU Yang, ZHOU Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9) : 91-94,115.
- [11] 薛永端,刘珊,王艳松,等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):112-117.
XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restraint [J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2016, 40(16):112-117.
- [12] 于建龙, 陈忠仁, 张勤, 等. 自动补偿消弧装置运行问题探讨 [J]. 高电压技术, 2005, 31(7):80-81.
YU Jianlong, CHEN Zhongren, ZHANG Qin, et al. Study on abnormal operation of auto compensation arc-suppression device [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7):80-81.
- [13] 李宁, 赵东. 10 kV 电压互感器在投运时开口三角电压异常分析 [J]. 电气制造, 2014(2):64-66.
- [14] 蒋仁江, 英云龙, 秦志成, 等. Z型接地变压器在PSCAD下的仿真模型构建 [J]. 价值工程, 2015, 29:137-138.
JIANG Renjiang, YING Yunlong, QIN Zhicheng, et al. Simulation model of zigzag grounding transformer by PSCAD [J]. Value Engineering, 2015, 29:137-138.
- [15] 陈锦胜. 配电线路使用PSCAD电缆模型建模 [J]. 广东电力, 2015, 28(3):82-85.
CHEN Jinsheng. Modeling for power distribution lines by using pscad cable model [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(3):82-85.
- [16] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7):57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7):57-64.
- [17] 王倩, 谭王景, 叶赞, 等. 基于ATP-EMTP的电弧接地故障的建模及仿真 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1):16-21.
WANG Qian, TAN Wangjing, YE Zan, et al. Modeling and simulating of arc grounding fault based on ATP-EMTP [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1):16-21.
- [18] 曾德辉. 含分布式电源配电网和微电网故障分析与保护新原理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
ZENG Dehui. New protection principles of distribution network and micro grid with distributed generation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

作者简介:



李海峰

李海峰(1976—),男,广东五华人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护(E-mail:lihf@scut.edu.cn);

陈嘉权(1996—),男,广东茂名人,硕士研究生,主要研究方向为配电网故障分析与继电保护(E-mail:c.jq02@mail.scut.edu.cn);

曾德辉(1988—),男,河南焦作人,博士后,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护(E-mail:danielzdh@126.com);

梁远升(1980—),男,广东广州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统故障分析与故障测距(E-mail:y_s_liang@126.com);

王钢(1966—),男,福建连江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统保护、控制及自动化(E-mail:wangg@scut.edu.cn)

High sensitive zero-sequence current protection for low-resistance grounding system

LI Haifeng, CHEN Jiaquan, ZENG Dehui, LIANG Yuansheng, WANG Gang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The relationship between zero-sequence voltage and current of low-resistance grounding system is analyzed, which reveals that the zero-sequence voltage of bus is proportional to the zero-sequence current of fault line when high impedance grounding fault occurs. Thus, the value of fault resistance can be indirectly reflected by zero-sequence voltage. On this basis, a high sensitive zero-sequence current protection scheme based on magnitude revise of zero-sequence voltage is proposed. Combining with the principle of the existing zero-sequence current protection, the measuring value of zero-sequence current is revised by the zero-sequence voltage. The revised value of zero-sequence current of each feeder is similar to that under single-phase metallic grounding fault at the head of the line, and the setting values of the proposed scheme are similar to those of the existing zero-sequence current protection, so the sensitivity of protection is significantly improved under high impedance grounding fault. The specific setting principles of parameters for the proposed scheme are discussed considering the factors of practical engineering. The simulation in PSCAD/EMTDC and the RTDS-based digital dynamic device test of actual protections prove that the proposed scheme is effective and the capability of the fault resistance endurance can be increased to about 1 000 Ω.

Key words: low-resistance grounding system; high impedance grounding fault; zero-sequence current protection; relay protection

附录

仿真所采用的 10kV 小电阻接地系统参数：换算到 10kV 侧的系统等效阻抗和主变漏抗之和为 0.444Ω ，接地小电阻和曲折变压器的零序阻抗均为 10Ω ；系统共有 4 条电缆馈线，长度分别为 6km、9km、12km 和 15km，型号均为 YJV₂₂-3*300，按照其尺寸结构^[15]搭建了相对应的频变模型，电气参数见表 A1。

表 A1 YJV₂₂-3*300 型号电缆模型电气参数

Table 2 Electrical parameters of YJV₂₂-3*300 cable model

电气参数	参数值	电气参数	参数值
直流电阻	$0.500\Omega/km$	零序电感	$6.398\text{ mH}/\text{km}$
正序电感	$0.318\text{ mH}/\text{km}$	零序电容	$0.370\mu\text{F}/\text{km}$
正序电容	$0.376\mu\text{F}/\text{km}$		