

配电网

基于变电站稳态监测信息的小电阻接地系统单相 接地检测性能提升方法

刘 健¹, 朱青松², 王毅钊^{1, 2}, 张志华^{1, 2}, 陈洁羽¹

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100;

2. 西安理工大学 电气工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了利用已有硬件资源提高小电阻接地系统单相接地选线性能, 研究了基于变电站自动化系统的全局稳态监测信息用于单相接地选线的方法。推导单相接地时母线零序电压和各条线路的零序电流, 计算极端情况下单相接地故障线路与健全线路的零序电流幅值之比, 提出单相接地选线方法, 指出以线路的零序电流作为单相接地选线的启动条件, 并给出零序电流的整定原则, 计算零序电流整定值下能够启动的最大过渡电阻。结合实例对所提方法进行验证, 结果表明利用变电站自动化系统的稳态监测信息能够显著提升小电阻接地系统单相接地检测性能。

关键词: 配电网; 小电阻接地系统; 单相接地选线; 遥测综合误差; 变电站自动化

DOI: 10.19585/j.zjdl.202304001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improvement of single-phase grounding fault detection for small resistance grounding systems based on steady-state monitoring information in the substation

LIU Jian¹, ZHU Qingsong², WANG Yizhao^{1,2}, ZHANG Zhihua^{1,2}, CHEN Jieyu¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to use the existing hardware sources to improve the line selection performance of single-phase grounding fault of small resistance grounding systems, a method for line selection of single-phase grounding fault based on the global steady-state monitoring information of the substation automation system is investigated. The zero-sequence voltage of the busbar and the zero-sequence current of each line in the case of single-phase grounding faults are deduced. The ratio of zero-sequence current of lines with single-phase grounding faults to that of non-fault lines under extreme conditions is analyzed. Moreover, the line selection method of single-phase grounding fault is proposed. The zero-sequence current is used as the starting criterion for line selection of single-phase grounding fault, and the setting principle of zero-sequence principle is introduced to calculate the maximum transition resistance that can be started under the setting value of zero-sequence current. An example is given to illustrate the proposed method, and the results show that the steady-state monitoring information of the substation automation system can remarkably improved the detection performance of single-phase grounding fault of small resistance grounding systems.

Keywords: distribution networks; small resistance grounding system; line selection of single-phase grounding fault; comprehensive telemetry error; substation automation

0 引言

尽管消弧线圈接地系统因其具有良好的熄弧

特性而得到了广泛应用, 但是考虑到消弧线圈的容量和体积等因素, 以及小电阻接地系统单相接地后过电压水平低的特点, 在电容电流水平和电缆化率都很高的区域采用小电阻接地方式也是合理的选择^[1-2]。

目前国内针对小电阻接地系统单相接地主要

采用定时限零序过电流保护方法,其整定值需躲过各条线路最大对地电容电流,灵敏度较低,抗过渡电阻能力差,一般在 $100\ \Omega$ 左右^[3-4]。

实际上超过 $100\ \Omega$ 的单相接地非常普遍,尽管一些较高过渡电阻的单相接地部位会逐渐碳化演变成较低过渡电阻,从而引起单相接地保护动作,但这个过程一般需要较长时间,增大了安全风险。而且在某些情况下较高过渡电阻不容易转化为较低过渡电阻,比如导线断线落入池塘或河流等,在这类场景下单相接地甚至不容易被及时察觉。

为了提升小电阻接地系统单相接地故障的抗过渡电阻能力,许多学者提出了多种解决方案。文献[5]利用健全线路和故障线路零序电流的相位差,提出一种基于中性点电流与线路零序电流投影量差动的高阻接地故障判断方法;文献[6-8]利用零序电压与零序电流间的比例关系,提出一种基于零序电压幅值修正的接地故障差动保护方案,但是这种方法需要配置专门的终端设备;华南理工大学提出一种基于零序电流-电压波形相似度的高阻接地故障检测方法^[9];文献[10]利用故障点上游的故障相工频变化量电流远大于健全相的特点,提出一种基于相电流工频变化量比值的高灵敏度故障区段定位方法;清华大学提出一种基于零序电流波形畸变凹凸性的高阻接地故障检测方法^[11-12];中国石油大学在分析小电阻接地配电网单相接地故障零序电流分布特征的基础上,提出一种改进的反时限零序过电流保护方法^[13]。

在实际应用中,小电阻接地系统已经普遍配置了定时限零序保护,能够较好地解决低阻接地保护问题^[14-16]。所有变电站基本都配置了自动化系统,能够采集各条线路的稳态零序电流和母线零序电压,当地站控主站或调度自动化系统主站可以利用采集到的全局稳态监测信息,提高小电阻接地系统的抗过渡电阻能力,本文即论述这种解决方案的关键技术问题。

1 单线接地的稳态故障特征和选线判据

在发生单相接地故障时,一个具有 n 条线路的小电阻接地系统的零序等效电路如图1所示,其中: R_N 为中性点接地电阻;假设单相接地发生在第 n 条线路, R_f 为单相接地过渡电阻; \dot{U}_0 为母线

零序电压; \dot{U}_f 为故障点等效零序电压源(幅值为相电压 U_φ); $C_{0i}(i=1,2,\dots,n-1)$ 为各条线路对地电容; k 为故障线路自身对地电容在故障点上游部分所占的比例($k=0\sim 1.0$), kC_{0n} 和 $(1-k)C_{0n}$ 分别为故障线路的故障点上游和下游对地电容; $\dot{I}_{0i}(i=1,2,\dots,n-1)$ 为各健全线路的零序电流; \dot{I}_{0f} 为故障线路的零序电流。

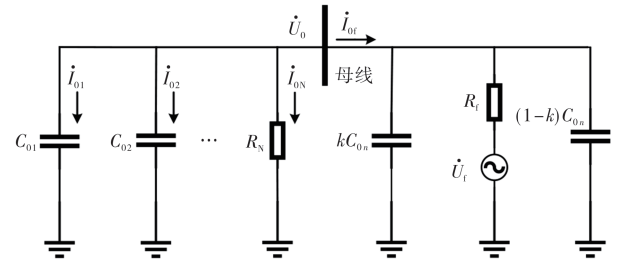


图1 小电阻接地系统的零序等效电路

Fig.1 Zero-sequence equivalent circuit of small resistance grounding system

母线的零序电压为:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_f \frac{R_N}{R_N + R_f(1 + j\omega R_N C_\Sigma)} \quad (1)$$

式中: ω 为交流电压的角频率; $C_\Sigma = \sum_{i=1}^n C_{0i}$ 为系统总对地电容。

健全线路 i 的零序电流为:

$$\dot{I}_{0i} = j\omega C_{0i} \dot{U}_0 \quad (2)$$

流过中性点接地电阻的零序电流为:

$$\dot{I}_{0N} = \frac{\dot{U}_f}{R_N + R_f(1 + j\omega R_N C_\Sigma)} \quad (3)$$

流过故障线路的零序电流为:

$$\dot{I}_{0f} = -\dot{U}_0 \left(\frac{1}{R_N} + j\omega \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} \right) \quad (4)$$

故障线路与健全线路 i 的零序电流之比 $\rho_{f,i}$ 为:

$$\rho_{f,i} = \frac{|\dot{I}_{0f}|}{|\dot{I}_{0i}|} \approx \frac{\left| \frac{1}{R_N} + j\omega \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} \right|}{|j\omega C_{0i}|} = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 R_N^2 \left(\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} \right)^2}}{\omega R_N C_{0i}} \quad (5)$$

由式(1)~(4)可知,母线零序电压和流过故

障线路、健全线路、中性点的零序电流均与单相接地过渡电阻成反比。

由式(5)可知,单相接地故障线路与健全线路的零序电流幅值比 $\rho_{l,i}$ 取决于中性点接地电阻 R_N 和各条健全线路对地电容的分布,而与单相接地过渡电阻的大小无关。 $\rho_{l,i}$ 随着 R_N 的增大而减小,并且 $\rho_{l,i}$ 始终大于1。在总健全线路电容电流中,式(5)的分母(以下简称“分母”)所对应的健全线路电容电流占比越大, $\rho_{l,i}$ 越小。各种典型情形下 $\rho_{l,i}$ 的最小值 ρ_{\min} 如表1所示,其中 b 为单条健全线路最大电容电流与健全线路总电容电流之比。

表1 各种典型情形下的 ρ_{\min}
Table 1 ρ_{\min} under various typical scenarios

R_N/Ω	ρ_{\min}		
	$b=0.5$	$b=0.4$	$b=0.3$
6	48.14	80.18	160.31
10	28.93	48.15	96.22
15	19.34	32.15	64.20

由表1可见, b 值越大则 ρ_{\min} 越小。一般情况下,母线各条出线的电容电流差别不会很大,极端情况下一条出线的电容电流也不会超过其余出线总电容电流的0.5倍。

对于给定的中性点接地电阻 R_N , ρ_{\min} 所对应的条件是:单相接地故障发生在对地电容最大的线路处,且分母对应的是对地电容最大的健全线路,其对地电容用 $C_{OH,\max}$ 表示。

一般在电缆化率较高、电容电流大(若采用谐振接地系统则消弧线圈体积太大)时才选择采用小电阻接地方式,考虑分母对应的健全线路电容电流占有健全线路总电容电流的一半的极端场景,

即 $C_{OH,\max} = 0.5 \sum_{i=1}^{n-1} C_{O_i}$,则由式(5)可得:

$$\rho_{\min} \approx \sqrt{\frac{1}{\omega^2 R_N^2 C_{OH,\max}^2} + 4} \quad (6)$$

根据文献[17],单位长度电缆线路对地电容为 $1.14 \mu\text{F}/\text{km}$,假设该条 10 kV 馈线为全电缆构成,并且考虑 30 km 的极端长度(对应电容电流 62 A), R_N 取较大值 15Ω ,代入式(6)得到 $\rho_{\min} = 6.52$ 。其他场景下的 ρ_{\min} 均大于极端场景,即各种情况下,单相接地故障线路与健全线路的零序电流幅

值比均不小于 6.52 。

在实际中还要考虑量测误差的影响。为保守起见,取遥测综合误差 $\pm 1.5\%$,考虑最不利的情况,即分子误差 -1.5% 、分母误差 $+1.5\%$,此时处于 ρ_{\min} 临界条件下实际观测到的 ρ'_{\min} 为:

$$\rho'_{\min} = \frac{6.52 \times 0.985}{1.015} = 6.33 \quad (7)$$

即在各种情况下考虑量测误差后,单相接地故障线路与健全线路的零序电流幅值比均不小于 6.33 。考虑一定的可靠系数后,阈值可取 5.0 。

根据上述规律,可以进行单相接地选线,具体方法如下。

在满足启动条件(将在第2章论述)后,选出零序电流最大的线路 p 和零序电流次大的线路 q ,并校验这两条线路的零序电流之比 $\rho_{p,q}$:

$$\rho_{p,q} = \frac{I_{0p}}{I_{0q}} \quad (8)$$

若满足

$$\rho_{p,q} > 5.0 \quad (9)$$

则认为零序电流最大的线路 p 发生了单相接地。

对于目前大多数变电站而言,其综合自动化系统都可以实现对电网实时数据的采集、监视、控制等。因此选线判据式(9)可以基于变电站综合自动化系统来实现:系统采集到的实时数据上传到站控主站或调度自动化系统主站,当地主站在掌握全局信息的基础上,通过选线判据即可判别故障线路。

另外,自动化系统中的时间同步装置采用可靠的对时方式,使得采集到的数据都具有统一的时间基准,从而保证数据在同一时间断面,避免对选线的干扰。

2 可保障精度的量程下限

当接地过渡电阻 R_l 较大时,变电站自动化系统采样得到的零序电流较小,则采样误差较大,进而导致遥测综合误差增大,甚至超过标准规定的最大遥测综合误差。因此,有必要分析能够保证遥测精度的最小零序电流。从量测精度的角度有两个需要考虑的环节,一个是变电站自动化系统,另一个是零序电流互感器。

设变电站自动化系统采样装置的A/D转换器位数为 d ,一个周期内采样点数为 N ,精工值取 a ,

且有专用状态位表示采样值正负, 采样单元的输入动态范围为0%~120% 零序电流互感器二次侧额定电流(设二次侧电流额定值为5 A, 则120% 额定电流对应为6 A)。在上述条件下, 采样单元单个量化阶梯对应的电流 Δi 为:

$$\Delta i = \frac{6}{2^d} \quad (10)$$

量测值越小则精度越差, 因此可以通过精工电流下的精度反映装置可保障精度的量程下限。在精工电流有效值 $i_a = a\Delta i$ 时, 其在一个周期内第 m 个采样点的采样值为:

$$i(t, m) = \sqrt{2} i_a \sin\left(2\pi \frac{m}{N} + \varphi\right) \quad (11)$$

式中: t 为第 m 个采样点所对应的时刻; φ 为电流相角。

第 m 个采样值占用的量化阶梯数 c 为:

$$c = \text{int} \left\lceil \left| \frac{i(t, m)}{\Delta i} \right| \right\rceil = \text{int} \left\lceil \left| \sqrt{2} a \cdot \sin\left(2\pi \frac{m}{N} + \varphi\right) \right| \right\rceil \quad (12)$$

式中: $\text{int}[x]$ 表示对 x 进行四舍五入取整。

采样装置第 m 个电流采样点的测量值为:

$$i(m) = \Delta i \cdot c = \Delta i \cdot \text{int} \left\lceil \left| \sqrt{2} a \cdot \sin\left(2\pi \frac{m}{N} + \varphi\right) \right| \right\rceil \quad (13)$$

一个周期内变电站自动化系统电流测量的有效值为:

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N i^2(m)}{N}} = \Delta i \cdot \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N \text{int} \left\lceil \left| \sqrt{2} a \cdot \sin\left(2\pi \frac{m}{N} + \varphi\right) \right| \right\rceil^2}{N}} \quad (14)$$

一个周期内综合自动化设备的量化误差 e 为:

$$e = \left| \frac{i_{\text{eff}} - i_a}{i_a} \right| \times 100\% = \left| \frac{\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N \text{int} \left\lceil \left| \sqrt{2} a \cdot \sin\left(2\pi \frac{m}{N} + \varphi\right) \right| \right\rceil^2}{N}} - a}{a} \right| \times 100\% \quad (15)$$

精工电流所反映的一次电流的实际值 I_a 为:

$$I_a = \frac{6a\gamma}{2^d} \quad (16)$$

式中: γ 为电流互感器变比(二次侧电流为5 A)。

表2所示为不同 N 和 a 值所对应的误差。

表2 不同参数所对应的量化误差

Table 2 Quantization errors corresponding to different parameters

a	$e/\%$			
	$N=64$	$N=96$	$N=128$	$N=192$
5	1.06	1.12	0.78	0.66
10	0.96	0.29	0.49	0.20
20	0.35	0.27	0.43	0.15
30	0.53	0.30	0.35	0.34
40	0.22	0.11	0.21	0.09

在变电站自动化系统的自动化装置采用12位A/D转换器的情况下, 当精工值 a 取10时, 对应自动化装置0.25%的量程。由表2可知, $a=10$ 时, 变电站自动化系统在0.25%以上量程范围内分区可以保证量化误差不大于1%。对零序电流互感器来说, 0.25%的量程下限已经低于S级零序电流互感器的量程下限(一般为1%), 而实际配置于变电站的零序电流互感器大多是P级, 其能保证精度的量程下限更高(一般为10%)。

综上所述, 对于变电站自动化装置而言, 可以确保量测精度的量程下限很低, 因此它不是限制单相接地检测抗过渡电阻性能的主要因素。零序电流互感器的精度范围才是制约单相接地检测抗过渡电阻性能的瓶颈。

为了提高单相接地检测的抗过渡电阻性能, 必要时还可以采用双量程零序电流互感器, 在零序电流较小时用小量程的零序电流互感器, 从而大幅提升单相接地检测的抗过渡电阻性能。此时自动化装置需要相应地设置两个通道测量线路的零序电流, 每次量测选取在非满量程且占总量程大的值再乘以相应的变比作为零序电流测量值。

3 单相接地检测启动条件

实际应用中, 即使采用专门零序电流互感器的情况下, 电源侧三相电压不对称以及线路上三相对地电容不一致也会在健全线路上引起不平衡电流 I_{0B} 。不平衡电流一般可取线路最大工作电流的0.2%^[18], 对于载流量600 A的10 kV线路, 不

平衡引起的最大零序电流 I_{0B} 可按约1.2 A考虑。

对于小电阻接地系统,因单相接地过渡电阻的差异造成的中性点零序电压和零序电流变化范围比小电流接地系统要宽得多。10 kV小电流接地系统和小电阻接地系统发生单相接地故障时,母线零序电压、故障线路零序电流与接地过渡电阻的关系分别如图2、图3所示。其中,小电阻接地系统的中性点电阻 $R_N=10\ \Omega$,谐振接地系统电容电流为62.43 A,消弧线圈过补偿度取10%。

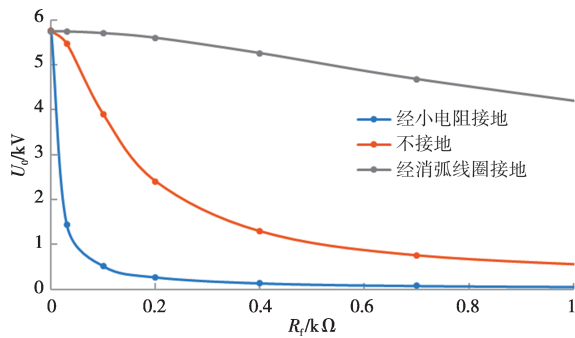


图2 母线零序电压和接地过渡电阻的关系

Fig.2 The relationship between busbar zero-sequence voltage and grounded transition resistance

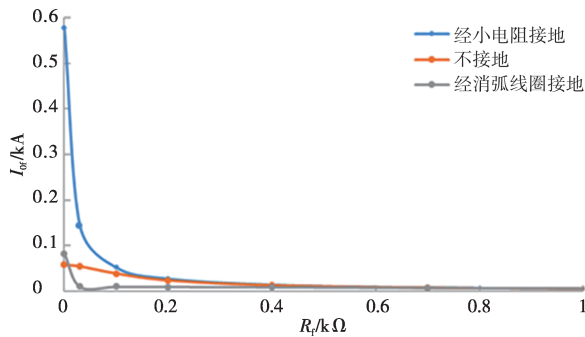


图3 故障线路零序电流和接地过渡电阻的关系

Fig.3 The relationship between zero-sequence current of the faulty line and the grounded transition resistance

考虑到在保证精度前提下,电流互感器比电压互感器具有更宽的动态范围,并且是在综合所有线路零序电流的基础上根据判据式(9)做出的决策,故采用流过各条线路的零序电流作为启动条件,只要检测到任何一条线路的零序电流超过阈值即启动。这样只需躲过本条馈线的不平衡电流即可,比采用流过中性点接地电阻的零序电流作为启动条件更灵敏。

设变电站自动化系统能够保证精度前提下的

最小零序电流为 $I_{0,\min}$,则启动阈值 $I_{0,\text{set}}$ 可以设置为:

$$I_{0,\text{set}} = \beta \times \max[I_{0B}, I_{0,\min}] \quad (17)$$

式中: β 为可靠系数,一般取1.2~1.3; $\max[x,y]$ 表示取 x 和 y 中的大值。

将 $I_{0,\text{set}}$ 作为 $I_{0,f}$ 代入式(4),可以计算出能够启动的最大接地过渡电阻 $R_{f,\max}$,即:

$$R_{f,\max} = \frac{\sqrt{(U_\varphi + I_{0,\text{set}}R_N)^2 + \omega^2 U_\varphi^2 R_N^2 \left(\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}\right)^2}}{I_{0,\text{set}} \sqrt{1 + \omega^2 R_N^2 C_\Sigma^2}} \quad (18)$$

由式(18)可知: C_Σ 越大则 $R_{f,\max}$ 越小;非故障线路总电容越小, $R_{f,\max}$ 越小。

一般有 $U_\varphi \gg I_{0,\text{set}}R_N$,因此式(18)可近似为:

$$R_{f,\max} \approx \frac{U_\varphi \sqrt{1 + \omega^2 R_N^2 \left(\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}\right)^2}}{I_{0,\text{set}} \sqrt{1 + \omega^2 R_N^2 C_\Sigma^2}} \quad (19)$$

由式(19)可知,基于变电站稳态监测全局信息的小电阻接地系统单相接地检测的抗过渡电阻性能取决于:能够保证精度的最小零序电流、各条出线的总对地电容、电容电流最大的线路的对地电容。

例如,对于 $I_{0,\text{set}}=5\ \text{A}$, $R_N=10\ \Omega$,有:

1) 系统电容电流400 A(相当于 $C_\Sigma=220.6\ \mu\text{F}$),健全线路总电容电流350 A(相当于 $\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}=193\ \mu\text{F}$)的极端情形下, $R_{f,\max}=1\ 110\ \Omega$ 。

2) 系统电容电流200 A(相当于 $C_\Sigma=110.3\ \mu\text{F}$),健全线路总电容电流160 A(相当于 $\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}=88.24\ \mu\text{F}$)的极端情形下, $R_{f,\max}=1\ 132\ \Omega$ 。

各种典型场景下的 $R_{f,\max}$ 如表3所示,其中 $I_{C\Sigma}$ 为系统电容电流, $I_{C\Sigma}$ 为健全线路总电容电流。

4 实例分析

某110 kV变电站I段母线采用小电阻接地方式, $R_N=10\ \Omega$ 。共有14条10 kV出线,其中出线1和2为电缆-架空混合馈线,其余主要为电缆并带有多个电缆出线的10 kV开闭所,出线1和2的电容电流分别为4.2 A和8.7 A,出线3—14的电容电流分别为16.5 A、19.3 A、18.9 A、32.8 A、21.2 A、29.6 A、25.1 A、22.2 A、17.5 A、14.2 A、11.6 A、17.7 A,总电容电流259.5 A(即 $C_\Sigma=$

表3 各种典型场景下的 $R_{f,max}$
Table 3 $R_{f,max}$ under various typical scenarios

R_N/Ω	$I_{0,set}/A$	$R_{f,max}/\Omega$		
		$I_{CS}=400 A$ 、 $I_{CS}=350 A$	$I_{CS}=200 A$ 、 $I_{CS}=160 A$	$I_{CS}=100 A$ 、 $I_{CS}=75 A$
6	4	1 418	1 439	1 442
	6	945	959	961
	8	709	719	721
10	3	1 850	1 886	1 912
	4	1 387	1 415	1 434
	5	1 110	1 132	1 147
15	2	2 705	2 774	2 847
	3	1 803	1 849	1 898
	4	1 353	1 387	1 423

143.07 μF)，电容电流最大的线路6的对地电容 $C_{06}=18.08 \mu F$ ，电容电流最小的线路1的对地电容 $C_{01}=2.32 \mu F$ 。

如果采用定时限零序电流保护，为了躲开自身电容电流，并留有一定的可靠系数，II段零序电流保护定值 $I_{0,set}$ 取为45 A。根据式(19)可知，当线路6发生单相接地时，其能启动的最大过渡电阻 $R_{f,max}=125.72 \Omega$ 。

4.1 单量程互感器下的保护能力

该母线近端发生金属性单相接地时故障线路的零序电流为577 A，若每条线路采用0.2S级零序电流互感器，并考虑到其在1%~120%额定电流范围内可以保证精度，可选用变比为500/5的零序电流互感器^[19]。

对于变电站自动化装置，取精工值 $a=10$ ，采样点数 $N=128$ 。根据变电自动化装置的性能，在零序电流互感器1%额定电流(即5 A)以上有不大于1.5%的综合遥测误差(满足继电保护要求)^[20]，该电流大于线路不平衡电流，在考虑可靠性的基础上，可以选择启动零序电流定值 $I_{0,set}=7 A$ 。

根据式(19)可知：当线路6发生单相接地时，其能启动的最大过渡电阻 $R_{f,max}=808.2 \Omega$ ；当线路1发生单相接地时，其能启动的最大过渡电阻 $R_{f,max}=823.6 \Omega$ 。

线路1和6分别发生800 Ω 过渡电阻的单相接地时，母线零序电压和各条线路零序电流的仿真结果如表4、表5所示。

由仿真结果可知，线路1和6分别发生800 Ω 过渡电阻的单相接地时，故障线路的零序电流均大于7 A的启动电流。

表4 线路1发生800 Ω 单相接地时的仿真结果
Table 4 Simulation results in case of 800 Ω single-phase grounding resistance on Line 1

参数	数值	参数	数值	参数	数值
U_0/V	67.72	I_{05}/A	0.223	I_{10}/A	0.262
I_{01}/A	7.405	I_{06}/A	0.387	I_{11}/A	0.206
I_{02}/A	0.103	I_{07}/A	0.250	I_{12}/A	0.168
I_{03}/A	0.195	I_{08}/A	0.349	I_{13}/A	0.137
I_{04}/A	0.228	I_{09}/A	0.296	I_{14}/A	0.209

表5 线路6发生800 Ω 单相接地时的仿真结果
Table 5 Simulation results in case of 800 Ω single-phase grounding resistance on Line 6

参数	数值	参数	数值	参数	数值
U_0/V	67.72	I_{05}/A	0.223	I_{10}/A	0.262
I_{01}/A	0.049	I_{06}/A	7.275	I_{11}/A	0.206
I_{02}/A	0.103	I_{07}/A	0.250	I_{12}/A	0.168
I_{03}/A	0.195	I_{08}/A	0.349	I_{13}/A	0.137
I_{04}/A	0.228	I_{09}/A	0.296	I_{14}/A	0.209

单相接地故障设置在线路1时， $\rho_{1,6}=I_{01}/I_{06}=19.13>5.0$ ，可正确判断出零序电流最大的线路1发生了单相接地；单相接地故障设置在线路6时， $\rho_{6,8}=I_{06}/I_{08}=20.85>5.0$ ，可正确判断出线路6发生了单相接地。

4.2 双量程互感器下的保护能力

为了提升零序电流互感器的精度，每条线路采用两台不同量程的0.2S级零序电流互感器，变比分别为500/5和150/5。为了避免故障时一次回路短时通过大电流而损坏测量仪表，小量程的电流互感器采用具有仪表保安限值的互感器，仪表保安系数取5，可以保证小量程的互感器在金属性接地故障时承受短时大电流而不会损坏^[21]。

此时，双量程互感器的量程下限为小量程互感器1%额定电流(即1.5 A)，根据变电站自动化装置的性能，可以在1.5 A以上获得1.5%的综合遥测精度。保留一定裕量，选择启动零序电流定值为2 A。

根据式(19)可知：当线路6发生单相接地时，其能启动的最大过渡电阻 $R_{f,max}=2 837.2 \Omega$ ；当线路1上发生单相接地时，其能启动的最大过渡电阻 $R_{f,max}=2 887.3 \Omega$ 。

线路1和6分别发生2 800 Ω 过渡电阻的单相接地时，母线零序电压和各条线路零序电流的仿真结果如表6、表7所示。

表6 线路1发生2 800 Ω单相接地时的仿真结果

Table 6 Simulation results in case of 2 800 Ω single-phase grounding resistance on Line 1

参数	数值	参数	数值	参数	数值
U_0/V	19.49	I_{05}/A	0.064	I_{10}/A	0.075
I_{01}/A	2.131	I_{06}/A	0.111	I_{11}/A	0.059
I_{02}/A	0.030	I_{07}/A	0.072	I_{12}/A	0.048
I_{03}/A	0.056	I_{08}/A	0.101	I_{13}/A	0.039
I_{04}/A	0.065	I_{09}/A	0.085	I_{14}/A	0.060

表7 线路6发生2 800 Ω单相接地时的仿真结果

Table 7 Simulation results in case of 2 800 Ω single-phase grounding resistance on Line 6

参数	数值	参数	数值	参数	数值
U_0/V	19.49	I_{05}/A	0.064	I_{10}/A	0.075
I_{01}/A	0.014	I_{06}/A	2.094	I_{11}/A	0.059
I_{02}/A	0.030	I_{07}/A	0.072	I_{12}/A	0.048
I_{03}/A	0.056	I_{08}/A	0.101	I_{13}/A	0.039
I_{04}/A	0.065	I_{09}/A	0.085	I_{14}/A	0.060

由表6、表7可知,线路1和6分别发生2 800 Ω过渡电阻的单相接地时,故障线路的零序电流均大于2 A的启动定值。对于线路1, $\rho_{1,6}=19.20>5.0$,可正确判断出线路1发生了单相接地;对于线路6, $\rho_{6,8}=20.73>5.0$,可正确判断出线路6发生了单相接地。

4.3 考虑仪表保安限值情况下的单量程互感器保护能力

前文考虑的是发生故障后,电流互感器在全量程范围内均能保证不超过1.5%的遥测综合误差。但从降低硬件成本的角度出发,不需在最大短路电流时仍然保证精度,一般要求在整定值附近保证精度,使保护能正常启动即可。

当电流互感器流过较大短路电流时,在不影响选线的前提下,允许互感器有较大的误差。因此,可以选择小量程的零序电流互感器:短路电流较大时,其值不超过仪表保安限值,零序电流互感器依然能保持不大于10%的量测误差;短路电流较小时,其值在互感器量测范围内,误差不超过标准规定。

综上,可以只采用一台0.2S级、变比为150/5、仪表保安系数为5的零序电流互感器,该互感器在1%~120%的量程范围内有不大于1.5%的综合遥测误差,启动零序电流定值为2 A。在5倍额定电

流幅值内量测误差不超过10%,考虑1%的遥测误差,此时最不利情形下实际观测到的 ρ'_{\min} 为:

$$\rho'_{\min} = \frac{6.52 \times 0.9 \times 0.99}{1.1 \times 1.01} = 5.23 \quad (20)$$

考虑一定的可靠系数后,阈值取4.0。其启动电流整定为2 A,因此抗过渡电阻能力与双量程互感器一致。

5 结论

1)利用变电站自动化系统的全局稳态监测信息,能够显著提升小电阻接地系统单相接地检测性能。

2)对于小电阻接地系统,单相接地时故障线路与健全线路的零序电流幅值之比不小于6.52,考虑量测误差等影响,可以设置故障线路与健全线路的零序电流幅值之比的阈值为5.0。根据这个规律可以进行单相接地选线,选出满足阈值条件的零序电流最大的线路即为单相接地线路。

3)线路的零序电流超过整定值可以作为单相接地选线的启动条件。零序电流的整定值要躲过三相最大不平衡电流,并超过使零序电流互感器和变电站自动化装置能够保证不低于1.5%综合遥测误差的最小零序电流量测值。

参考文献

- [1] 刘健,宋国兵,张志华.配电网单相接地故障处理[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [2] 林志超,刘鑫星,王英民,等.基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J].电力系统保护与控制,2018,46(22):15-21.
LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 15-21.
- [3] 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.
- [4] 刘健,董新洲,陈星莺.配电网故障定位与供电恢复[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [5] 盛亚如,丛伟,卜祥海,等.基于中性点电流与零序电流投

- 影量差动的小电阻接地系统高阻接地故障判断方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 17-22.
- SHENG Yaru, CONG Wei, BU Xianghai, et al. Detection method of high impedance grounding fault based on differential current of zero-sequence current projection and neutral point current in low-resistance grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 17-22.
- [6] 任伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电阻接地系统高阻接地故障纵联差动保护[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3276-3282.
- REN Wei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Longitudinal differential protection of high resistance grounding faults in low-resistance grounding system [J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3276-3282.
- [7] 杨帆, 刘鑫星, 沈煜, 等. 基于零序电流投影系数的小电阻接地系统高阻接地故障保护[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1128-1133.
- YANG Fan, LIU Xinxing, SHEN Yu, et al. High resistance ground fault protection of low resistance grounding system based on zero sequence current projection coefficient [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1128-1133.
- [8] 薛永端, 汪洋, 徐丙垠. 小电阻接地系统高灵敏度阶段式零序过电流保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6217-6227.
- XUE Yongduan, WANG Yang, XU Bingyin. High sensitive zero-sequence stage current protection for low-resistance grounding system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6217-6227.
- [9] 肖瑞超, 徐涵. 基于零序电流-电压波形相似度的小电阻接地系统高阻接地故障检测方法[J]. 机电工程技术, 2021, 50(12): 64-67.
- XIAO Ruichao, XU Han. High-resistance grounding fault detection in low-resistance grounding system based on similarity difference of zero-sequence current-voltage waveform [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(12): 64-67.
- [10] 廖芳群, 李海锋, 陈嘉权, 等. 小电阻接地系统高灵敏性接地故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 150-158.
- LIAO Fangqun, LI Haifeng, CHEN Jiaquan, et al. High sensitive ground fault location in a low-resistance grounded system [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 150-158.
- [11] 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.
- [12] 王宾, 崔鑫, 董新洲. 配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107.
- WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107.
- [13] 汪洋, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电阻接地系统接地故障反时限零序过电流保护[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 150-157.
- WANG Yang, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Zero-sequence inverse-time overcurrent protection in low resistance grounding system with grounding fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 150-157.
- [14] 李雯, 庄朋成, 陈云飞, 等. 变电站联络电缆接地电流缺陷分析[J]. 山东电力技术, 2022, 49(6): 56-60.
- LI Wen, ZHUANG Pengcheng, CHEN Yunfei, et al. Analysis of substation Tie cable grounding current defect [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(6): 56-60.
- [15] 许利姣, 苏建成, 方惠玲. 小电阻接地系统零序电流保护定值设置存在问题及对策[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(3): 95-97.
- XU Lijiao, SU Jiancheng, FANG Huiling. Issues existing in zero sequence current protection setting value in small resistance grounding system and its countermeasures [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2021, 39(3): 95-97.
- [16] 吴娜, 刘子晖, 樊淑娴. 基于 Pearson 相关性的小电阻接地有源配电网接地保护[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 136-143.
- WU Na, LIU Zihui, FAN Shuxian. Grounding protection of low resistance grounding active distribution network based on Pearson correlation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 136-143.
- [17] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册 第一册: 电气一次部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 导体和电器选择设计技术规定: DL/T 5222—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 互感器试验导则 第1部分: 电流互感器: GB/T 22071.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [20] 国家能源局. 智能变电站设计技术规定: DL/T 5510—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [21] 国家能源局. 电流互感器和电压互感器选择及计算规程: DL/T 866—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-02-02

作者简介:

刘健(1967), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为配电网及其自动化技术。

(本文编辑: 徐 吟)