

基于中性点阻尼与零序电流相位变化关系的高阻接地保护方法

宋昭昭,秦晓军,闻勇

(国网河南省电力公司焦作供电公司,河南 焦作 454000)

摘要:光伏作为典型的逆变型分布式电源并网规模不断增大,对小电阻接地配电网接地故障特性带来深刻影响。由于高阻接地故障时信号微弱不易辨识,传统零序过电流保护在高阻接地情况下容易拒动,仅靠降低整定值又会导致金属性接地故障时健全馈线保护误动。为了解决高阻接地故障传统零序过电流保护拒动的问题,利用并联小电阻投入前后,故障线路和健全线路零序电流分别与中性点零序电流之间相位差变化量的差异进行故障辨识,提出一种改变中性点小电阻的高阻接地故障保护方法,该方法耐受过渡电阻能力强。首先分析了含逆变型分布式电源(IIDG)小电阻接地配电网单相接地故障零序电流特征,然后基于故障线路、健全线路和中性点零序电流的故障特性,对高阻接地故障进行辨识,提出了基于改变中性点小电阻的高阻接地保护方案。最后在PSCAD中搭建了含IIDG的小电阻接地配电网模型进行仿真,验证了所提方法的有效性。

关键词:小电阻接地配电网;高阻接地;零序电流;相位差变化量;故障辨识

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26450

High Resistance Grounding Protection Method Based on Relationship Between Neutral Point Damping and Phase Variation of Zero Sequence Current

SONG Zhaozhao, QIN Xiaojun, WEN Yong

(State Grid Henan Electric Power Company Jiaozuo Power Supply Company,
Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) is a typical inverter type distributed power supply with increasing grid-connected scale, which has a profound impact on the ground fault characteristics of small resistance ground distribution network. Because the signal is weak and difficult to identify when the high resistance ground fault occurs, the traditional zero sequence overcurrent protection is easy to reject in the case of high resistance ground fault, and only reducing the setting value will cause the sound feeder protection to misoperate when the metal ground fault occurs. In order to solve the problem of traditional zero sequence overcurrent protection for high resistance ground fault, a method of high resistance ground fault protection by changing the small neutral resistance was proposed by using the difference in phase difference between the zero-sequence current of the faulty line and the zero-sequence current at the neutral point before and after the parallel small resistor is put into operation. This method has a strong ability to withstand transition resistance. Firstly, the zero sequence current characteristics of single-phase grounding fault in distribution network with inverter interfaced distributed generators (IIDG) small resistance were analyzed, and then the high resistance grounding fault was identified based on the fault characteristics of faulty line, healthy line and zero sequence current at neutral point. Finally, a small resistance ground distribution network model with IIDG was built in PSCAD for simulation, and the effectiveness of the proposed method was verified.

Key words: small resistance ground distribution network; high resistance ground; zero sequence current; change in phase difference; fault identification

基金项目:河南省电力公司科技项目(5217C0240003)

作者简介:宋昭昭(1987—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为变电、配网运行、故障处置技术研究工作,

Email:songzhaozhao2008@126.com

电力系统的发展与能源息息相关。可再生能源正成为未来全球能源结构的主要组成部分,预计到2025年初,新能源将超过化石燃料成为全球最主要的电力来源^[1]。

随着城市配电网的高速发展,电缆线路对人身相对安全、占用土地少且不影响环境美观的优势日益凸显,在城市配电系统中所占的比例逐渐增大^[2-3],电容电流急剧增加,可能导致系统发生单相接地故障时产生高幅值的弧光接地过电压,从而对人身安全及设备的安全运行构成威胁^[4]。配电网对地电容电流大幅提升,单相接地故障发生时电容电流补偿困难,中性点经小电阻接地方式能有效降低弧光过电压和谐振过电压^[5-6],逐渐被配电网广泛采用^[7]。

零序过电流保护按照躲开本线路最大对地电容电流整定,最高能够耐受100 Ω 左右的过渡电阻^[8-9],且故障点距离母线越远,灵敏性越低。文献[10]从高阻接地故障非线性特征入手,利用区段合成零序电流的同步波形,提出同步3次谐波群体比相选线方法。文献[11]针对谐振接地系统零序电压检测难度高的问题,提出的基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法,提高了谐振接地系统高阻接地故障检测的可靠性。在配电网高阻接地故障辨识与保护研究领域,学者们提出多种方法。文献[12]考虑并联小电阻投入后故障线路与非故障线路低频暂态零序电流中暂态直流分量比值关系,提出了一种基于低频暂态零序电流畸变率的灵活接地系统单相高阻接地故障辨识方法。文献[13]利用中性线和各出线零序电流幅值比值的差异构造集中式接地保护判据。

在高阻接地故障情况下,过渡电阻值可能高达上千欧姆,导致故障线路的零序电流可能仅有几安,零序过电流保护容易发生拒动。虽然高阻接地故障电流微弱,但其长期未切除将可能演化为更严重的短路故障,扩大故障范围,甚至造成火灾和人员伤亡。因此,如何有效提高零序保护耐受过渡电阻的能力是小电阻接地系统亟需解决的难题。

本文针对高阻接地故障保护拒动问题开展如下工作:1)分析含逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generators, IIDG)小电阻接地配电网单相接地故障零序电流特征。2)基于故障线路、健全线路和中性点零序电流的故障特

性,提出基于改变中性点小电阻的高阻接地保护方案。3)在PSCAD中搭建了含IIDG的小电阻接地配电网模型进行仿真,验证了所提方法的有效性。

1 有源配电网单相接地故障分析

本节分析了含IIDG小电阻接地配电网单相接地故障的特征,为零序电流相位差变化量的高阻接地保护方法提供理论基础。

1.1 单相接地故障等效电路

含IIDG小电阻接地配电网单相接地故障示意图如图1所示。其中,10 kV母线共有 n 条出线 $l_1 \sim l_n$,分布式电源T接于 l_n ,IIDG的公共连接点(point of common coupling, PCC)位于故障馈线。其中,SG为系统电源, R_n 为中性点接地小电阻。含IIDG的馈线 l_n 在 f 处发生单相接地故障, R_f 为故障点过渡电阻。

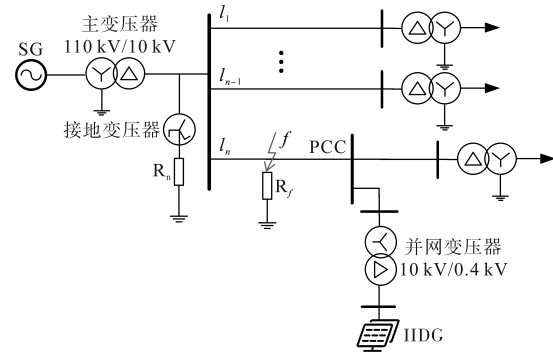


图1 单相接地故障拓扑图

Fig.1 Single-phase grounding fault topology

健全线路和故障线路故障点下游的线路阻抗主要对故障暂态过程产生影响,对零序电流相位变化基本没有影响,为方便对故障稳态零序电流的分析,可将其忽略,仅保留零序对地电容。 f 处发生过渡电阻为 R_f 的单相接地故障零序网络图如图2所示。其中, C_{0i} ($i=1, 2, \dots, n-1$)为健全馈线 $l_1 \sim l_{n-1}$ 的零序对地电容; C_{0n1} , C_{0n2} 分别为故障馈线 l_n 故障点上、下游的零序对地电容; $Z_L^{(0)}$ 为故障点上游线路零序阻抗; $\dot{I}_{0f}$ 为流过故障线路首端的零序电流; $\dot{I}_{0R}$ 为流过中性点小电阻上的零序电流; $\dot{I}_{0i}$ ($i=1, 2, 3, \dots, n-1$)为健全线路首端零序电流; $\dot{U}_{0f}$ 为故障点零序电压; $\dot{U}_0$ 为母线零序电压。

1.2 单相接地故障等效电路

由于线路的正、负序阻抗相等,根据节点电压法求解得到流经线路 l_n 保护的零序电流 $\dot{I}_{0M}$ 为

$$\dot{I}_{0M} = \frac{[\dot{E}_S + \dot{I}_{DG}(Z_S^{(1)} + Z_L^{(1)})]}{2(Z_S^{(1)} + Z_L^{(1)}) + (3R_n + 3R_f + Z_S^{(0)} + Z_L^{(0)})} \quad (1)$$

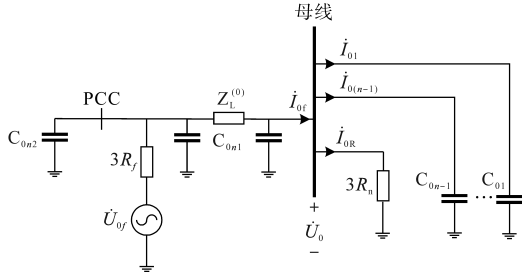


图2 单相接地故障零序等效电路图

Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit diagram of single-phase grounding fault

式中: $\dot{E}_s$ 为系统电源电压; $Z_s^{(1)}$ 为系统电源的正序阻抗; $Z_L^{(0)}$ 为故障点上游线路零序阻抗; R_n 为中性点接地小电阻; $Z_s^{(0)}$ 为系统电源的零序阻抗。

在图2所示的单相接地故障零序等效电路图中,由于IIDG并网变压器的中性点不接地,IIDG并不会出现在单相接地故障的零序网络中,在不忽略故障点上游线路零序阻抗的情况下,IIDG的接入使得故障点零序等值电压不再等于故障点故障前相电压的相反数, $\dot{U}_{0f}$ 相比于不含IIDG的配电网产生了幅值和相位上的差异:

$$\dot{U}_{0f} = \frac{[\dot{E}_s + \dot{I}_{DC}(Z_s^{(1)} + Z_L^{(1)})](3R_n + 3R_f + Z_s^{(0)} + Z_L^{(0)})}{2(Z_s^{(1)} + Z_L^{(1)}) + (3R_n + 3R_f + Z_s^{(0)} + Z_L^{(0)})} \quad (2)$$

基于图2可得小电阻接地系统单出线接地故障特征如下。母线零序电压 $\dot{U}_0$ 表示为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{0f} Z_0 Z_P}{(3R_f + Z_0)(Z_L^{(0)} + Z_P)} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} Z_0 = (Z_P + Z_L^{(0)}) // Z_Q \\ Z_P = 3R_n // \frac{1}{j\omega(\frac{1}{2}C_{0n1} + \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i})} \\ Z_Q = \frac{1}{j\omega(\frac{1}{2}C_{0n1} + C_{0n2})} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω 为工频角频率; $\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}$ 为健全线路 $l_1 \sim l_{n-1}$ 零序对地电容之和。

小电阻接地系统发生单相接地故障后,故障后流经健全馈线的零序电流 i_{0i} 为本线路对地电容电流:

$$i_{0i} = j\omega C_{0i} \dot{U}_0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

流经中性点小电阻的零序电流为

$$i_{0R} = \dot{U}_0 / 3R_n \quad (6)$$

针对故障馈线,其零序电流 i_{0f} 为流过所有健全馈线上的零序电流与中性点零序电流之和:

$$i_{0f} = -(\sum_{i=1}^{n-1} i_{0i} + i_{0R}) = -\dot{U}_0 (j\omega \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} + \frac{1}{3R_n}) \quad (7)$$

由式(3)、式(5)可得,当发生金属性单相接地故障即过渡电阻 R_f 为0时,健全馈线上的零序电流 i_{0i-mgf} 为

$$i_{0i-mgf} = \frac{j\omega C_{0i} Z_P \dot{U}_{0f}}{(Z_L^{(0)} + Z_P)} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (8)$$

由式(3)、式(7)可得,当发生过渡电阻值为 R_f 的接地故障时,故障馈线上的零序电流 i_{0f} 如下式所示:

$$i_{0f} = -\frac{Z_0 Z_P (j\omega \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} + \frac{1}{3R_n}) \dot{U}_{0f}}{(3R_f + Z_0)(Z_L^{(0)} + Z_P)} \quad (9)$$

观察式(8)、式(9)可以发现,当单相接地故障的过渡电阻值增大到一定程度时,发生金属性接地故障时健全线路的零序电流值可能大于高阻接地故障时故障线路的零序电流值,具体的过渡电阻临界条件如下式所示:

$$R_f > \frac{Z_0 [j\omega (\sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} - C_{0f}) + \frac{1}{3R_n}]}{3j\omega C_{0i}} \quad (10)$$

由此可见,针对高阻接地故障传统零序过电流保护拒动的问题,不能仅靠降低整定值来提高过渡电阻的耐受能力,否则将无法区分上述两种情况,有可能导致金属性接地故障时健全馈线保护的误动作。

以母线零序电压 $\dot{U}_0$ 为基准,绘制故障后各馈线与中性点处零序电流的相量图如图3所示。其中,中性点支路上只有接地小电阻 R_n ,因此流过中性点小电阻的电流 i_{0R} 呈阻性,与 $\dot{U}_0$ 同相位; $\sum_{i=1}^{n-1} i_{0i}$ 为各健全馈线零序电流之和,对地电容电流呈容性,与 $\dot{U}_0$ 正交,相位超前 90° ;故障线路上的零序电流 i_{0f} 为 i_{0R} 和 $\sum_{i=1}^{n-1} i_{0i}$ 相量和的反向相量,其与母线零序电压 $\dot{U}_0$ 反方向的夹角为 θ 。

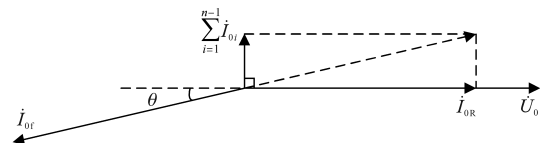


图3 故障后各出线与中性点零序电流相量图

Fig.3 Phasor diagram of zero sequence current of each outlet line and neutral point after fault

2 基于零序电流相位差变化量的接地保护方法

2.1 保护基本原理

由第1节分析可知,根据图3,求得单出线故障时故障线路的零序电流 i_{0f} 与母线零序电压 $\dot{U}_0$ 反方向的夹角 θ 的表达式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} I_{0i}}{I_{0R}}\right) = \arctan(3R_n \omega C_0 l) \quad (11)$$

式中: C_0 为单位长度线路的对地零序电容值; l 为所有健全线路的全长。

我国小电阻接地系统的中性点接地电阻阻值一般在 $5 \sim 20 \Omega$ 之间^[14],根据国内 10 kV 小电阻接地系统的工程经验,10 kV 小电阻接地系统的中性点小电阻阻值一般设计在 $10 \sim 20 \Omega$ 之间,并联小电阻的阻值设置与并联小电阻前中性点小电阻的阻值保持一致。参考灵活接地配电网,通过投入并联小电阻改变中性点电阻值,根据小电阻投入前后线路零序电流相位差的差异,可以区分故障和健全线路,完成高阻接地故障辨识。

投入并联小电阻后,列写故障线路零序电流与中性点零序电流的夹角 θ' 为

$$\theta' = \arctan(3R'_n \omega C_0 l) \quad (12)$$

式中: R'_n 为并联小电阻投入后中性点小电阻的等效阻值。

基于式(11)和式(12),以中性点零序电流为基准,绘制投入中性点并联小电阻之后的各馈线零序电流相量图,结合图3,将小电阻投入前后中性点零序电流作为基准,二者相量关系如图4所示。其中,投入小电阻之后的电气量添加上标“'”,相量用灰色示意, $\Delta\theta$ 为并联小电阻投入前后的故障线路零序电流的相位差,可计算出其满足下式:

$$\Delta\theta = \theta - \theta' = \arctan\left(\frac{3\omega C_0 l (R_n - R'_n)}{1 + 9R_n R'_n \omega^2 C_0^2 l^2}\right) \quad (13)$$

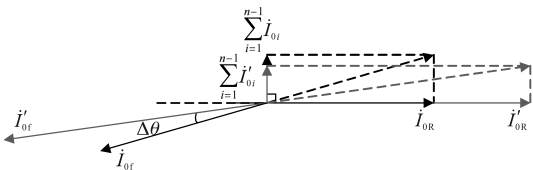


图4 并联小电阻投入前后各出线与中性点零序电流相量关系

Fig.4 The phasor relationship between each outlet and zero sequence current at neutral point before and after shunt small resistance input

由以上分析可以看出, IIDG 接入配电网后,虽然整体抬升了故障点零序电压,改变了各出线和中性点零序电流的幅值和相位,但以中性点零序电流为基准,各零序电流之间的相位关系不会发生改变。另一方面,过渡电阻的增大会导致零序电流的减小,但从式(13)可以看出,改变中性点小电阻阻值前后,故障线路零序电流与反向中性点零序电流之间夹角的变化量 $\Delta\theta$ 表达式中没有过渡电阻,与其无关,仅与中性点小电阻阻值和全部健全线路零序对地电容有关,当系统中性点电阻和投入的并联小电阻阻值确定时,仅通过配电网线路参数和拓扑结构即可确定 $\Delta\theta$ 的取值范围。

10 kV 配电网中,通常情况下全系统对地电容电流总和不超过 200 A, $\omega \sum_{i=1}^n C_{0i}$ 最大为 11.5 mS^[15],因此健全线路总对地电容 $C_0 l$ 不会超过 3.66×10^{-5} F。设定原配电网中性点小电阻 R_n 为 20Ω ,投入的并联小电阻阻值也是 20Ω ,即并联后等效阻值 R'_n 为 10Ω ,绘制式(13)所对应的曲线图如图5所示。其中,纵坐标为并联小电阻投入前后故障线路零序电流的 $\Delta\theta$,横坐标为系统所有健全馈线的总零序对地电容。

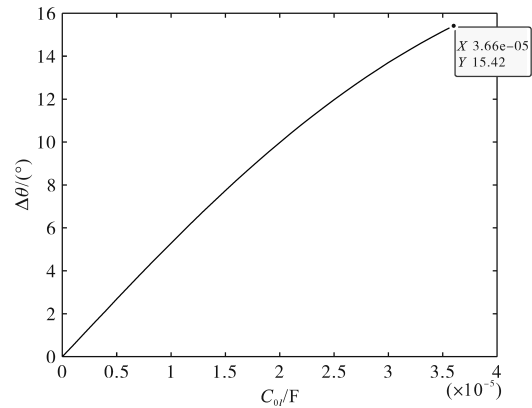


图5 故障线路与中性点零序电流相位差的变化量

Fig.5 Variation of phase difference between fault line and zero sequence current at neutral point

由图5可以看出, $\Delta\theta$ 的大小与所有健全馈线零序对地电容的总和成正比,当健全线路总对地电容 $C_0 l$ 取最大值 3.66×10^{-5} F 时,中性点小电阻阻值改变前后,以中性点零序电流为基准,故障线路零序电流的相位差值 $\Delta\theta$ 达 15.42° 。

针对非故障馈线,并联小电阻投入后,流经健全馈线的零序电流 i'_{0i} 本质没有发生变化,始终为本线路零序对地电容电流,其值为

$$\dot{I}_{0i} = j\omega C_{0i} \dot{U}'_0 \quad (14)$$

可以看出健全馈线首端零序电流相量仍与母线零序电压正交,即超前中性点零序电流 90° ,中性点阻值的改变不会导致二者相位关系的改变,理论上健全馈线的 $\Delta\theta$ 始终为 0° 。

由以上分析可知,通过投入中性点并联小电阻,可以根据中性点小电阻阻值改变前后出线零序电流与中性点电流相位差的变化特征,来区分故障和健全线路。具体地,以中性点零序电流为基准,健全馈线零序电流相位恒超前 90° ,相位差为 0° ;当中性点小电阻阻值确定时,故障线路零序电流相位差与系统零序对地电容参数成正比,配电网出线越多,线路越长, $\Delta\theta$ 越大,故障和健全馈线的差异越大,理论推导的判据如下式所示:

$$\begin{cases} 0^\circ < \Delta\theta < 15.42^\circ & \text{故障馈线} \\ \Delta\theta = 0^\circ & \text{健全馈线} \end{cases} \quad (15)$$

2.2 保护基本原理

通常配电网出线和分支较多,且含IIDG的配电网线路拓扑结构较为复杂,线路的总长度较长;另一方面,小电阻接地配电网中电缆占比大,电缆线路的零序对地电容较大,所以健全线路总对地电容取值较大。区别于健全馈线,故障线路的 $\Delta\theta$ 的值将与 0° 产生较大的差异,可据此区分故障和健全馈线。

考虑量测设备误差,供稳态保护用的5P级电流互感器在额定一次电流下相位差的误差限值为 $60'$,另外考虑到实际应用中线路参数、计算过程等不确定因素可能带来误差的情况,为了保证高阻接地故障辨识结果的可靠性,保留一定的裕度,基于式(15)将健全馈线的判据设定为 $-1.2^\circ < \Delta\theta < 1.2^\circ$ 。

针对故障馈线 θ_{set} 取值的下限,可根据配电网线路参数代入式(13)进行求取,具体表达式如下式所示:

$$\theta_{\text{set}} = K_{\text{rel}} \arctan\left(\frac{3\omega C_0 L(R_n - R'_n)}{1 + 9R_n R'_n \omega^2 C_0^2 L^2}\right) \quad (16)$$

式中: θ_{set} 为故障馈线 $\Delta\theta$ 的取值下限; K_{rel} 为设定的裕度系数,取 0.9 ; L 为去除配电网中最长馈线之后所有馈线的总长度; C_0 为线路单位长度的零序对地电容值。

可以看出,当 R_n 和 R'_n 分别为 $20\ \Omega$ 和 $10\ \Omega$ 时,只需要知道配电网线路长度和对地电容参数,即可对 θ_{set} 进行整定。针对故障馈线的取值上限,同样保留一定的裕度,取 18° ,值得注意的是,

以上所有取值的前提是中性点原有小电阻和后来投入的并联小电阻均为 $20\ \Omega$,针对原中性点小电阻阻值为其他的情况,故障馈线 $\Delta\theta$ 上下限均需作相应的修改,如 R_n 和 R'_n 分别为 $10\ \Omega$ 和 $5\ \Omega$ 时,式(15)中故障馈线 $\Delta\theta$ 的上限由 15.42° 修改为 9.25° ,其他情况不再一一列举。

根据以上分析,基于改变中性点小电阻前后零序电流相位差变化量的高阻接地故障保护判据如下式所示:

$$\begin{cases} \theta_{\text{set}} < \Delta\theta < 18^\circ & \text{故障馈线} \\ -1.2^\circ < \Delta\theta < 1.2^\circ & \text{健全馈线} \end{cases} \quad (17)$$

判据示意图如图6所示。若中性点小电阻投入前后线路首端零序电流与中性点电流的夹角的差值落入深灰色区域,则将此线路判定为故障线路,若落入浅灰色区域则判定为健全线路。

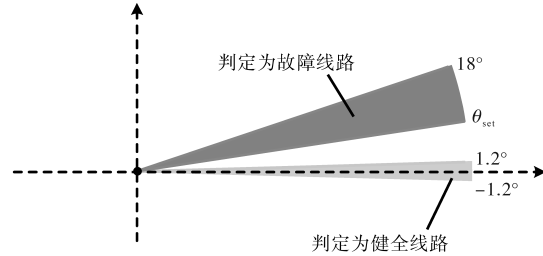


图6 基于零序电流相位差的保护判据示意图

Fig.6 Schematic diagram of protection criterion based on zero sequence current phase difference

2.3 保护流程

针对高阻接地故障传统零序过电流保护拒动的问题,本节通过投入中性点并联小电阻,基于中性点小电阻改变前后馈线零序电流和中性点电流相位差变化量的差异,提出适应高阻接地故障的保护方案。具体流程如下:

1) 针对原中性点小电阻 $20\ \Omega$ 、投入的并联小电阻 $20\ \Omega$ 即投入后等效阻值为 $10\ \Omega$ 的含IIDG配电网,将线路单位零序对地电容参数 C_0 、剔除一条最长馈线之后所有线路的总长 L 代入到式(16)中计算。

2) 当量测设备检测到馈线零序电流的大小大于启动电流 I_s 时保护启动,记录并处理中性点零序电流、馈线零序电流信号。

受三相不同期合闸、线路三相对地参数不平衡、架空线路换位欠佳、非全相供电等因素的影响,正常运行的系统中会产生不平衡电流。为了保证配电系统正常运行情况下保护不误动作,启动电流 I_s 的整定应躲过系统可能出现的最大不平衡电流。 $10\ \text{kV}$ 小电阻接地系统架空线路和电

缆线路正常运行时的最大不平衡电流分别约为 0.37 A 和 0.26 A^[16],保护装置常接入 3 倍零序电流,启动电流应该大于 1.11 A。故障后零序电流的大小随过渡电阻的增大而减小,因此启动电流整定值的大小将影响保护方案耐受过渡电阻的能力。

实际应用中,可根据保护所在配电网的实际情况,考虑供电区域的重要程度和经济因素,自行设定启动电流 I_s 。表 1 为本文方法与已有方法成本对比,零序电流互感器的精度越高,保护耐受的过渡电阻值越大,但相应量测设备的经济成本越高,启动电流的设定取决于电流互感器经济成本和保护耐受高阻接地故障效果之间的取舍。基于以上两方面,考虑传变误差等不确定因素的影响,保留一定的裕度,本文设定启动电流 I_s 为 1.5 A。

表 1 本文方法与已有方法成本对比

Tab.1 The cost comparison between the proposed method and the existing methods

方法	互感器类型	互感器价格/元	性价比
传统零序电流保护	10P 级零序 CT	1 000 ~ 2 000	成本低,灵敏度不高,性价比一般
自适应整定方法	0.2S 级零序 CT	5 000 ~ 10 000	成本高,灵敏度高,性价比低
本文方法	5P 级零序 CT	2 000 ~ 3 000	成本较低,灵敏度较高,性价比高

3) 基于零序电流相位差的故障辨识方法是了解决高阻接地故障传统零序过电流保护拒动的问题,因此针对低阻接地故障,可以参考现有零序过电流保护设定一个整定值 I_{min} ,当检测到零序电流 $|\dot{I}_{0m}|$ 大于此值时,直接判定所在线路为故障馈线,不再投入中性点并联小电阻来计算零序电流相位差,从而能够尽快地切除故障。综合考虑健全出线最大零序电流幅值、保护裕度等因素,将 I_{min} 整定为 30 A。

4) 当零序电流小于 I_{min} 时,需要利用所提方法判断其为金属性接地故障的健全线路还是高阻接地故障的故障线路。具体地,投入中性点并联小电阻后,中性点等效电阻由 20 Ω 变为 10 Ω ,记录此时馈线零序电流 $\dot{I}_{0m}$ 和中性点零序电流 $\dot{I}_{0R}$ 之间的相位差,计算小电阻投入前后 $\dot{I}_{0m}$ 和 $\dot{I}_{0R}$ 之间相位差的变化量 $\Delta\theta$ 后,断开并联小电阻使中性点电阻恢复 20 Ω 。

5) 根据式(17)判断馈线是否故障,具体地,若 $\Delta\theta$ 满足 $\theta_{set} < \Delta\theta < 18^\circ$,则判定保护所在线路发

生了高阻接地故障,保护动作于跳闸;若 $\Delta\theta$ 满足 $-1.2^\circ < \Delta\theta < 1.2^\circ$,则判定为健全馈线,保护不动作。若故障和健全馈线的判据均不满足,可能发生了量测或计算错误,保护将进行重新计算研判。另外,考虑到环境扰动引起电压暂降等短时干扰,对保护设置 100~200 ms 的延时,避开环境扰动引起电压暂降等短时干扰,若误动作已经发生,则利用现有的暂态能量在时频域上的分布差异^[17]对故障与扰动进行辨识,对因扰动引起的跳闸执行合闸操作。

上述基于改变中性点小电阻前后零序电流相位差的高阻接地故障保护方案的流程图如图 7 所示。

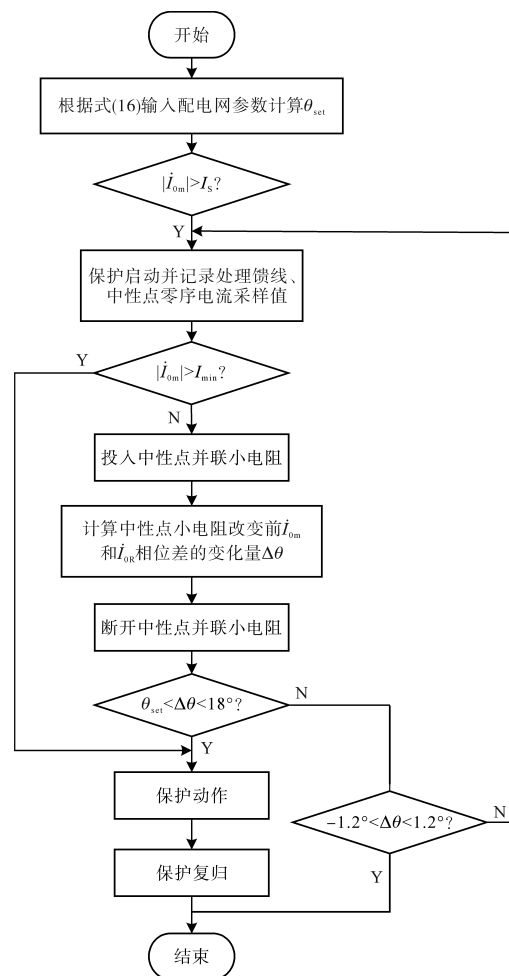


图 7 基于改变中性点小电阻前后零序电流相位差的保护方案流程图

Fig.7 Flowchart of the protection scheme based on the phase difference of zero sequence current before and after changing the small neutral resistance

3 仿真与实验验证

为了验证所提高阻接地保护方案的有效性,

在PSCAD/EMTDC中搭建如图8所示的含IIDG的小电阻接地配电网。配电网原有中性点小电阻和并联小电阻 R_n 均为 $20\ \Omega$,主变压器、IIDG并网变压器的变比与容量如图8所示。线路 l_1, l_2 长度为 5 km , l_3 长度为 15 km , $l_4\sim l_6$ 长度为 10 km ,线路首端分别装设有保护1~6。线路均采用型号为YJV22-6/10kV-3*70mm²的电缆线路,单位零序对地电容参数为 $C_0=124.28\times 10^{-9}\text{ F/km}$,PQ控制的光伏模型封装为IIDG模块T接于线路,各出线末端分别接有每相 $1\text{ MW}+0.1\text{ Mvar}$ 的恒阻抗负载模型。

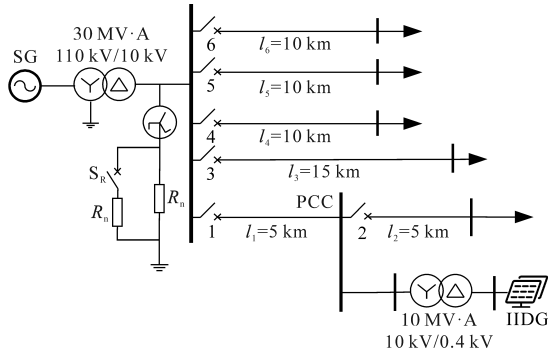


图8 含IIDG的中性点小电阻接地配电网仿真拓扑
Fig.8 Simulation topology of neutral small resistance earthed distribution network with IIDG

3.1 案例验证

在图8所示的拓扑中,去除最长的 l_3 馈线后线路总长度 L 为 40 km ,将 L 及 C_0 取值代入式(16),计算得到 θ_{set} 取值为 2.4° 。本节仿真案例中,故障时间设置为 0.1 s ,中性点并联小电阻的投入时间为 0.2 s 。为验证基于相位差变化量的高阻接地故障辨识方法的准确性,在分布式电源未接入的情况下,在线路 l_2 中点处设置过渡电阻为 $500\ \Omega$ 的单相接地故障,流经各保护处的零序电流和中性点零序电流波形图如图9所示。其中, $3I_{01}\sim 3I_{06}$ 分别为保护1~6处的3倍零序电流, I_{0R} 为中性点零序电流。可以看出, 0.2 s 时各零序电流的幅值和相位均发生了变化,并联小电阻投入前后中性点和线路零序电流的相位关系变化情况如图10所示。

为了更清晰地展示零序电流幅值和相位,将仿真数据记录如表2所示。

其中, $R_n=20\ \Omega$ 代表并联小电阻投入前, $R'_n=10\ \Omega$ 代表并联小电阻投入后即中性点等效小电阻为 $10\ \Omega$ 。 $3I_{01}\sim 3I_{06}$ 分别为保护1~6处的3倍零序电流, $3I_{01B}\sim 3I_{06B}$ 表示以中性点电流 I_{0R} 作为基准后相应的零序电流,其相角即为线路零序电流和

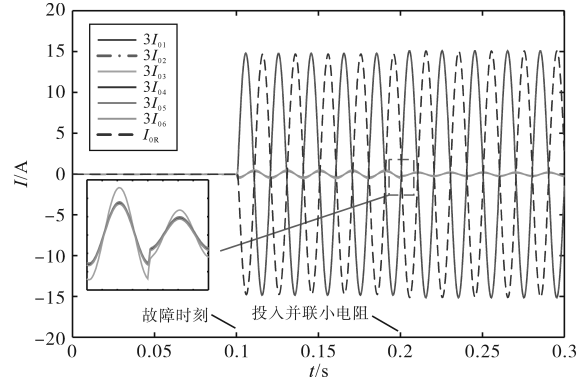


图9 l_2 中点处故障零序电流波形图

Fig.9 Waveforms of fault zero sequence current at l_2 midpoint

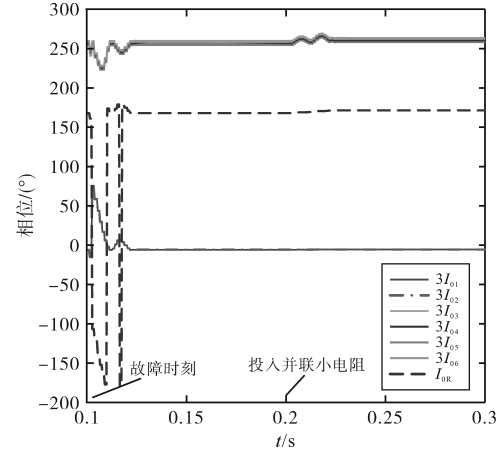


图10 l_2 中点处故障零序电流相位图

Fig.10 Phase diagrams of fault zero sequence current at l_2 midpoint

表2 l_2 中点处故障各电流仿真数据

Tab.2 Simulation data of each fault current at l_2 midpoint

线路	零序电流/A	$R_n = 20\ \Omega$	$R'_n = 10\ \Omega$	$\Delta\theta$
l_1	$3I_{01}$	$14.37\angle -6.02^\circ$	$14.67\angle -5.58^\circ$	3.00°
	$3I_{01B}$	$14.37\angle -173.98^\circ$	$14.67\angle -176.98^\circ$	
l_2	$3I_{02}$	$14.38\angle -5.30^\circ$	$14.66\angle -5.20^\circ$	3.34°
	$3I_{02B}$	$14.38\angle -173.26^\circ$	$14.66\angle -176.60^\circ$	
l_3	$3I_{03}$	$0.50\angle 258.03^\circ$	$0.26\angle 261.78^\circ$	-0.31°
	$3I_{03B}$	$0.50\angle 90.07^\circ$	$0.26\angle 90.38^\circ$	
l_4	$3I_{04}$	$0.34\angle 258.14^\circ$	$0.17\angle 261.90^\circ$	-0.32°
	$3I_{04B}$	$0.34\angle 90.18^\circ$	$0.17\angle 90.50^\circ$	
l_5	$3I_{05}$	$0.34\angle 258.14^\circ$	$0.17\angle 261.90^\circ$	-0.32°
	$3I_{05B}$	$0.34\angle 90.18^\circ$	$0.17\angle 90.50^\circ$	
l_6	$3I_{06}$	$0.34\angle 258.14^\circ$	$0.17\angle 261.90^\circ$	-0.32°
	$3I_{06B}$	$0.34\angle 90.18^\circ$	$0.17\angle 90.50^\circ$	
中性点	I_{0R}	$14.29\angle 167.96^\circ$	$14.65\angle 171.40^\circ$	—

中性点电流之间的夹角 θ , $\Delta\theta$ 为中性点小电阻阻值改变前后 θ 的变化量。可见,线路 l_3 和 $l_4\sim l_6$ 的 $\Delta\theta$ 分别为 -0.31° 和 -0.32° ,位于区间 $(-1.2^\circ, 1.2^\circ)$ 内,判定为健全馈线;线路 l_1 和 l_2 的 $\Delta\theta$ 分别为 3° 和 3.34° ,位于区间 $(2.4^\circ, 18^\circ)$ 内,判定为故障线

路,由于保护1动作时限比保护2多 Δt ,所以保护2将动作于跳闸,有选择性地切除高阻接地故障,验证了所提保护方案的有效性。

3.2 IIDG 影响验证

为了验证IIDG接入对所提保护方案的影响,在线路 l_2 中点设置过渡电阻为 $500\ \Omega$ 的接地故障,分别改变IIDG的有功出力,记录零序电流的仿真数据如表3所示,其余条件设置同3.1节。其中, l_4, l_5, l_6 作为长度相等的健全馈线,零度电流相等,在表格中合并在一起。可以看出,IIDG的接入将对零序电流有一定的助增作用,与第2节得出的结论一致。另一方面,IIDG也改变了零序电流的相位,但各线路与中性点零序电流之间相对的相位关系不会发生改变,夹角 $\Delta\theta$ 基本不变,可以看到随着IIDG出力的不断增大,中性点小电阻阻值改变前后上下浮动不超过 0.04° ,可以认为所提方案不受IIDG接入的影响,与理论分析的结果一致。

表3 不同IIDG出力下 l_2 中点处故障各电流仿真数据

Tab.3 Simulation data of fault currents at l_2 midpoint under different IIDG outputs

线路	P_{ref}/MW	零序电流/A		$\Delta\theta$
		$R_n = 20\ \Omega$	$R'_n = 10\ \Omega$	
l_1	0	$14.37\angle-6.02^\circ$	$14.67\angle-5.58^\circ$	3.00°
	2	$14.75\angle-4.51^\circ$	$15.06\angle-4.12^\circ$	2.99°
	4	$15.13\angle-3.05^\circ$	$15.42\angle-2.70^\circ$	3.03°
	8	$15.77\angle-0.23^\circ$	$16.06\angle 0.04^\circ$	3.01°
l_2	0	$14.38\angle-5.30^\circ$	$14.66\angle-5.20^\circ$	3.34°
	2	$14.77\angle-3.79^\circ$	$15.06\angle-3.74^\circ$	3.33°
	4	$15.13\angle-2.34^\circ$	$15.42\angle-2.43^\circ$	3.36°
	8	$15.78\angle 0.48^\circ$	$16.06\angle 0.44^\circ$	3.32°
l_3	0	$0.50\angle 258.03^\circ$	$0.26\angle 261.78^\circ$	-0.31°
	2	$0.51\angle 259.52^\circ$	$0.26\angle 263.22^\circ$	-0.32°
	4	$0.52\angle 260.96^\circ$	$0.27\angle 264.64^\circ$	-0.30°
	8	$0.55\angle 263.79^\circ$	$0.29\angle 267.39^\circ$	-0.32°
l_4, l_5, l_6	0	$0.34\angle 258.14^\circ$	$0.17\angle 261.90^\circ$	-0.32°
	2	$0.34\angle 259.64^\circ$	$0.18\angle 263.33^\circ$	-0.31°
	4	$0.35\angle 261.08^\circ$	$0.18\angle 264.79^\circ$	-0.33°
	8	$0.37\angle 263.91^\circ$	$0.19\angle 267.50^\circ$	-0.31°
中性点	0	$14.29\angle 167.96^\circ$	$14.65\angle 171.40^\circ$	—
	2	$14.68\angle 169.64^\circ$	$15.05\angle 172.84^\circ$	—
	4	$15.04\angle 170.89^\circ$	$15.41\angle 174.27^\circ$	—
	8	$15.68\angle 173.73^\circ$	$16.04\angle 177.01^\circ$	—

3.3 不同过渡电阻和故障位置的仿真实验

为了验证不同过渡电阻阻值和故障位置对所提保护方案的影响,分别在线路 l_2 、线路 l_3 和母线处设置过渡电阻为 $50\ \Omega, 500\ \Omega, 1\ 000\ \Omega, 3\ 000\ \Omega$

的单相接地故障。IIDG出力设置为 $6\ \text{MW}$,故障位置设置在距离线路 l_2 首端 $1\ \text{km}$ 处,记录流经各保护和中性点的零序电流的幅值、相位如表4所示。

表4 l_2 故障时中性点并联小电阻投入前各电流仿真数据

Tab.4 Simulation data of each current before putting the neutral parallel small resistance into l_2 fault

零序 电流	R_f/Ω			
	50	500	1 000	3 000
$3I_{01}$	$107.11\angle-2.53^\circ$	$15.35\angle-2.68^\circ$	$7.87\angle-2.69^\circ$	$2.67\angle-2.69^\circ$
$3I_{02}$	$107.19\angle-1.81^\circ$	$15.36\angle-1.97^\circ$	$7.87\angle-1.98^\circ$	$2.67\angle-1.98^\circ$
$3I_{03}$	$3.73\angle 261.51^\circ$	$0.54\angle 261.36^\circ$	$0.27\angle 261.36^\circ$	$0.54\angle 261.36^\circ$
$3I_{04}$	$2.47\angle 261.62^\circ$	$0.36\angle 261.47^\circ$	$0.18\angle 261.47^\circ$	0
$3I_{05}$	$2.47\angle 261.62^\circ$	$0.36\angle 261.47^\circ$	$0.18\angle 261.47^\circ$	0
$3I_{06}$	$2.47\angle 261.62^\circ$	$0.36\angle 261.47^\circ$	$0.18\angle 261.47^\circ$	0
I_{0R}	$106.49\angle 171.43^\circ$	$15.26\angle 171.29^\circ$	$7.82\angle 171.28^\circ$	$2.65\angle 171.28^\circ$

其中,当零序电流小于 $1\ \text{A}$ 时,认为零序电流过小,在表中表示为0。按照图7所示的保护流程,启动电流 I_s 整定为 $1.5\ \text{A}$,即零序电流小于 $1.5\ \text{A}$ 时认为馈线没有故障,保护不启动; $I_{\min}$ 整定为 $30\ \text{A}$,即零序电流大于 $30\ \text{A}$ 时直接判定为故障,保护动作于跳闸;只有零序电流处在 $(1.5\ \text{A}, 30\ \text{A})$ 之间时,中性点并联小电阻投入,相应馈线才会进行 $\Delta\theta$ 的计算和故障研判。基于此,当 R_f 为 $50\ \Omega$,线路 l_1 和 l_2 判定为故障线路,保护2由于无人延时而动作于跳闸,有选择性地切除了故障线路 l_2 ;当 R_f 为 $500\ \Omega, 1\ 000\ \Omega$ 和 $3\ 000\ \Omega$ 时,线路 $l_3\sim l_6$ 首端零序电流均小于启动值,保护3~6均可靠不动作。以上两种情况保护将复归,不再进行 $\Delta\theta$ 的计算。

其他情况均需要记录中性点并联小电阻投入后的数据,如表5所示。

表5 l_2 故障时中性点并联小电阻投入后各电流仿真数据

Tab.5 Simulation data of each current after the neutral shunt resistance is put into the l_2 fault

零序 电流	R_f/Ω			
	50	500	1 000	3 000
$3I_{01}$	—	$15.66\angle-2.32^\circ$	$7.95\angle-2.23^\circ$	$2.68\angle-2.15^\circ$
$3I_{02}$	—	$15.66\angle-1.94^\circ$	$7.95\angle-1.84^\circ$	$2.68\angle-1.77^\circ$
$3I_{03}$	$2.16\angle 263.70^\circ$	—	—	—
$3I_{04}$	$1.43\angle 263.81^\circ$	—	—	—
$3I_{05}$	$1.43\angle 263.81^\circ$	—	—	—
$3I_{06}$	$1.43\angle 263.81^\circ$	—	—	—
I_{0R}	$122.95\angle 173.31^\circ$	$15.65\angle 174.65^\circ$	$7.95\angle 174.75^\circ$	$2.68\angle 174.82^\circ$

根据表4和表5中数据,中性点小电阻阻值改变前后线路和中性点零序电流相位差的变化量 $\Delta\theta$ 的计算结果如图11所示。可以看出,线路 l_1 和 l_2 的 $\Delta\theta$ 位于区间 $(2.4^\circ, 18^\circ)$ 内,判定为故障馈线,保护2因动作时限短而动作于跳闸,有选择性地切除故障线路 l_2 ;线路 $l_3\sim l_6$ 的 $\Delta\theta$ 位于区间 $(-1.2^\circ, 1.2^\circ)$ 内,判定为健全馈线,保护不动作。由此可以看出,故障和健全线路的 $\Delta\theta$ 差异明显,具有明显的区分度,且所提方案能够耐受很高的过渡电阻值,在 R_f 高达3 000 Ω 时仍适用。

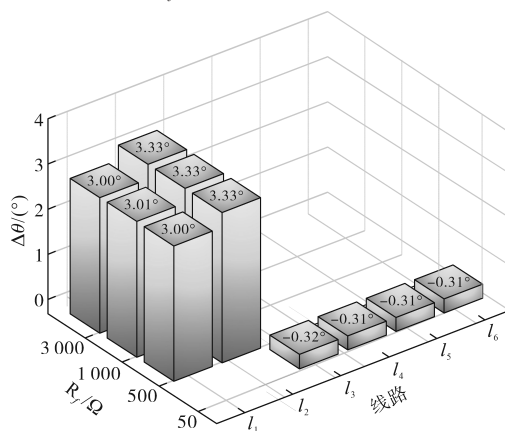


图11 l_2 故障时线路和中性点零序电流相位差的变化量
Fig.11 Change of phase difference between line and neutral zero sequence current when l_2 is faulty

3.4 真型试验验证

为验证所提方法在实际现场的有效性,在某10 kV真型试验场开展真型试验。试验现场如图12所示,其中,中性点小电阻与并联小电阻均为20 Ω 。



图12 试验平台
Fig.12 Experimental platform

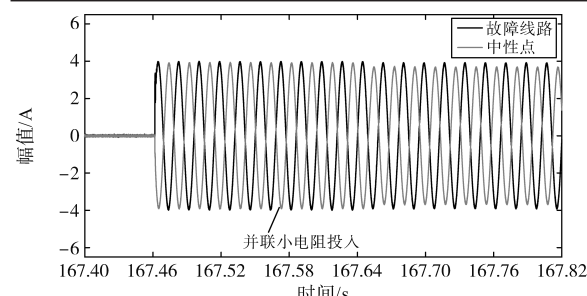
设置单相接地故障过渡电阻分别为50 Ω , 500 Ω , 2 000 Ω 和3 000 Ω ,考虑到断路器的动作时限一般在80~120 ms,所以在故障发生0.2 s后投入并联小电阻,合闸角分别设置 $30^\circ, 90^\circ$ 。根据式(16)代入线路参数计算得到故障线路判据为 $3.6^\circ < \Delta\theta < 18^\circ$,试验结果如表6所示。

过渡电阻2 000 Ω , 3 000 Ω 零序电流如图13所示。

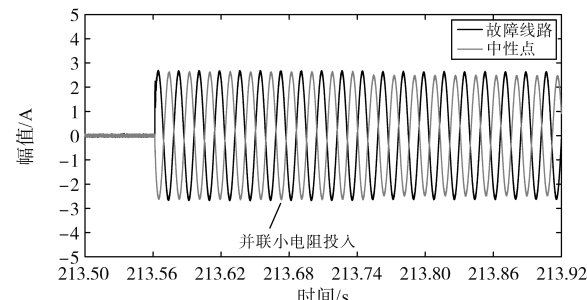
表6 试验结果

Tab.6 Experimental results

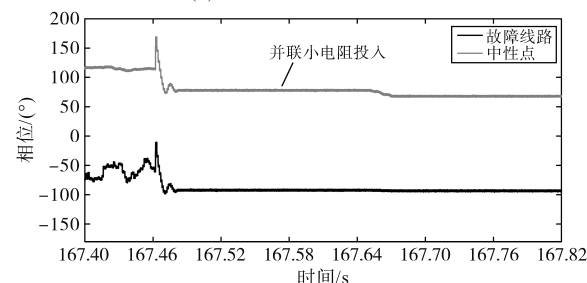
过渡电阻/ Ω	合闸角	并联小电阻不投入 保护是否动作	并联小电阻投入保 护是否动作
50	30°	是	—
	90°	是	—
100	30°	是	—
	90°	是	—
2 000	30°	否	是
	90°	否	是
3000	30°	否	是
	90°	否	是



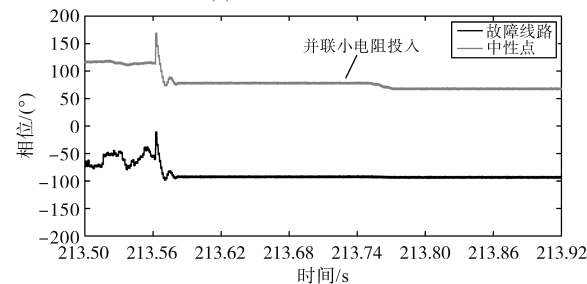
(a)过渡电阻2 000 Ω 时零序电流



(b)过渡电阻3 000 Ω 时零序电流



(c)过渡电阻2 000 Ω 时相位



(d)过渡电阻3 000 Ω 时相位

图13 过渡电阻2 000 Ω , 3 000 Ω 零序电流

Fig.13 Transition resistance 2 000 Ω , 3 000 Ω zero sequence current

图13a、图13c分别为合闸角为 30° 过渡电阻 $2\,000\,\Omega$ 时的中性点与故障线路零序电流图像与相位图,图13b、图13d分别为合闸角为 30° 过渡电阻 $3\,000\,\Omega$ 时的中性点与故障线路零序电流图像与相位图,并联小电阻投入前后,过渡电阻 $2\,000\,\Omega$ 、 $3\,000\,\Omega$ 时的 $\Delta\theta$ 分别为 9.0° 和 9.1° ,保护动作。说明本方法在面临高阻接地故障时,在实际环境中依旧能够可靠动作,验证了本方法的有效性与可行性。

4 结论

本文提出了一种基于零序电流相位差变化量的高阻接地故障保护方法,该方法基于并联小电阻投入前后线路与中性点零序电流相位差变化量的差异来判断故障与健全线路,解决了高阻接地故障传统零序过电流保护拒动的问题,满足继电保护灵敏性和可靠性的要求。在实际应用中,不需要使用集中式保护装置对各出线之间进行对比,降低了配电网电缆出线较多时一一纵向比较带来的计算复杂性,具有更好的实用性。

参考文献

- [1] 张童彦,廖清芬,唐飞,等. 基于气象资源插值与迁移学习的广域分布式光伏功率预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023,43(20):7929-7940.
Zhang Tongyan, Liao Qingfen, Tang Fei, et al. Wide-area distributed photovoltaic power forecast method based on meteorological resource interpolation and transfer learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(20):7929-7940.
- [2] Shu H, Liu X, Tian X. Single-ended fault location for hybrid feeders based on characteristic distribution of traveling wave along a line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020,36(1):339-350.
- [3] Peng N, Liu X, Liang R, et al. Edge computing based fault sensing of the distribution cables based on time-domain analysis of grounding line current signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022,37(5):4404-4417.
- [4] Xiao Y, Ouyang J, Xiong X, 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):1-13.
- [5] 董俊,李一凡,束洪春,等. 配电网馈出线单相永久性接地故障性质辨识方法[J]. 电工技术学报, 2020,35(21):4576-4585.
Dong Jun, Li Yifan, Shu Hongchun, et al. Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feedout line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(21):4576-4585.
- [6] 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.
- [7] 熊卫红,毛兴华,李景禄,等. 小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(14):166-172.
Xiong Weihong, Mao Xinghua, Li Jinglu, et al. Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(14):166-172.
- [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] 唐会祥,陈智勇. 小电阻接地系统高阻接地故障反时限零序过电流保护[J]. 电工技术, 2023(20):105-109.
Tang Huixiang, Chen Zhiyong. Zero-sequence inverse-time overcurrent protection against high-impedance grounding fault in low-resistance grounding system[J]. Electrician Technology, 2023(20):105-109.
- [10] 韦明杰,石访,张恒旭,等. 基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(24):8358-8372.
Wei Mingjie, Shi Fang, Zhang Hengxu, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(24):8358-8372.
- [11] 管廷龙,薛永端,徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(23):73-81.
Guan Tinglong, Xue Yongduan, Xu Bingyin. Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(23):73-81.
- [12] 李晓波,张世乐,彭超红. 基于低频暂态零序电流畸变率的灵活接地系统高阻接地保护[J]. 电力系统自动化, 2024,48(13):256-282.
Li Xiaobo, Zhang Shile, Peng Chaohong. High-resistance grounding protection for flexible grounded systems based on low-frequency transient zero-sequence current distortion rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024,48(13):256-282.
- [13] 吴海江,陈锦荣,廖峰,等. 小电阻接地配电系统集中式接地保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(21):141-149.

- Wu Haijiang, Chen Jinrong, Liao Feng, et al. Centralized protection for a grounding fault in a low-resistance grounding distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 141-149.
- [14] 任伟. 小电阻接地系统非稳定性高阻接地故障保护技术[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021: 4-7.
- Ren Wei. Protection technology of unstable high resistance grounding fault in low resistance grounding system[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021: 4-7.
- [15] 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.
- [16] 刘鑫星. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障集中式保护[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018: 33-34.
- Liu Xinxing. Centralized protection for grounding fault in low-resistance grounding system based on zero-sequence current comparison[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018: 33-34.
- [17] 邓丰, 徐帆, 冯思旭, 等. 基于行波全波形能量分布特征的高阻接地故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8177-8190.
- Deng Feng, Xu Fan, Feng Sixu, et al. Research on high impedance fault detection method based on energy distribution characteristics of traveling wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8177-8190.
- 收稿日期: 2025-02-10
修改稿日期: 2025-04-17
-
- (上接第51页)
- 1916.
- [20] Jin X, Nisn H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVDC system under commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10265-10277.
- [21] 严雨豪, 周步祥, 陈实, 等. 双馈风电机组低/高电压复合穿越的控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(17): 32-39.
- Yan Yuhao, Zhou Buxiang, Chen Shi, et al. Research on Control strategy for doubly fed induction generator under low/high voltage ride through [J]. Electric Drive, 2022, 52(17): 32-39.
- [22] Duan J, Guan Y, Li S E, et al. Distributional soft actor-critic: off-policy reinforcement learning for addressing value estimation errors[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 33(11): 6584-6598.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准管理委员会. GB/T 19963.1—2021: 风电场接入电力系统技术规定第1部分: 陆上风电[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 19963.1—2021: Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- 收稿日期: 2025-09-01
修改稿日期: 2025-10-16