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

盛亚如[1],丛 伟[1],卜祥海[2],李晓明[1]
(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061;
2. 国网山东省电力公司 淄博供电公司,山东 淄博 255000)

摘要:在分析小电阻接地系统发生接地故障时故障线路、非故障线路零序电流与中性点电流相量关系的基础上,提出了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。接地故障发生后,故障线路经过接地点和系统中性点构成基本的零序回路,由于中性点电流呈阻性,故障线路零序电流在中性点电流上的投影与中性点电流的差值较小,而非故障线路零序电流基本呈容性,非故障线路零序电流在中性点上的投影与中性点电流的差值较大,据此引入比值计算的方法可较为灵敏、可靠地检测出高阻接地故障。分析了线路参数不对称、负荷不对称、系统电压不对称等情况对所提方法的影响,PSCAD 仿真结果表明,所提方法能够可靠地检测出高阻接地故障,受各种不对称情况的影响较小,具有较高的灵敏度和可靠性。

关键词:小电阻接地配电网;高阻接地故障;电流投影量;电流差动
中图分类号:TM 77 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.003

0 引言

我国配电网普遍采用中性点非有效接地的运行方式,其优点是发生单相接地故障后可带故障继续运行最多 2 h,对于提高配电网供电可靠性效果显著[1-2];其不足是接地选线准确率有待进一步提高。随着配电网络结构的完善,大部分重要负荷都具备了双电源甚至多电源备用供电能力,发生故障后控制备用电源快速自动投入,完全可以确保供电可靠性不受影响,在此背景下,近年来配电网中性点经小电阻接地的运行方式逐步受到关注[3-5]。

中性点经小电阻接地的配电网需配备零序过流保护,一般情况下零序过流保护动作定值的整定计算需要考虑躲过被保护线路电容电流和正常运行时最大不平衡电流的影响[6],因此零序过流保护的动作定值都偏高。而实际配电网中的接地故障通常伴随着树障、避雷器不完全击穿以及导线跌落在土地、水塘等情况[7],产生的对地电流小,零序过流保护往往会出现拒动的情况。若系统长时间带高阻故障运行,可能会使线路的相间绝缘击穿,扩大故障范围和故障性质。因此,对中性点经小电阻接地的配电网高阻接地故障进行快速、可靠检测具有重要意义。

目前针对高阻故障的检测方法主要分为稳态法和暂态法两大类。

a. 在稳态法方面,文献[8]以零序电压作为参考轴,比较了故障线路与非故障线路中零序电流与零序电压的相位关系,利用零序电流的有功功率方向进行故障检测;文献[9]比较了各馈线的零序电流相对于零序电压的余弦分量,此余弦分量的数值最大的馈线即为故障线路;文献[10]选取零序电流中偶次谐波的能量作为判据检测高阻接地故障。另外,高阻故障也可以利用系统的零序导纳[11-12]、阻尼率[13]、负序电流[14]等物理量进行检测。上述方法均需要用到零序电压,部分方法还需要对各线路的零序电流进行比较,在适用性方面限制较大。

b. 在暂态法方面,文献[15]利用故障线路和任一健全线路的暂态零序电流与母线暂态零序电压,通过计算得到的故障点过渡电阻识别高阻接地故障;文献[16]利用小波分析方法对故障线路与非故障线路的电压、电流进行离散小波分解重构,通过提取的特征系数作为检测高阻故障的判据。暂态法一方面对硬件有较高要求,另一方面对突变信号或者干扰信号较为敏感,抗干扰能力较弱,容易发生误判。

本文提出了一种基于中性点电流与零序电流投影量差动原理的高阻接地故障判断方法。该方法以中性点电流为保护启动量,并以此为参考轴,得到各线路零序电流相对该参考轴的投影,再与中性点电流进行差动计算。对于故障线路而言,该差动电流较小;对于非故障线路而言,该差动电流较大,二者有明显的区分度。本文所提方法不受对地电容电流和各种参数不对称的影响,且只需要本线路零序电流和中性点电流,不需要考虑其他馈线的电气量,具有良好的适用性。

收稿日期:2018-01-22;**修回日期**:2018-12-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877126)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877126)

1 高阻接地故障电气量特性分析

中性点经小电阻接地的配电网发生高阻接地故障时,故障电流分布示意图如图1所示。图中,R_0为中性点电阻;R_G为故障点接地电阻;$C_Ⅰ$、$C_Ⅱ$、$C_Ⅲ$和$R_Ⅰ$、$R_Ⅱ$、$R_Ⅲ$分别为3条出线的每相等效对地电容和绝缘电阻;设线路Ⅲ的C相发生高阻接地故障,$\boldsymbol{I}_{R_0}$为中性点电流,$3\boldsymbol{I}_{0Ⅰ}$、$3\boldsymbol{I}_{0Ⅱ}$、$3\boldsymbol{I}_{0Ⅲ}$分别为支路Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的零序电流。

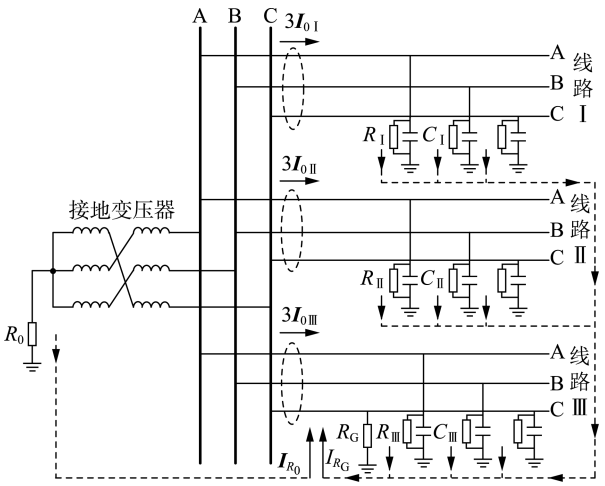

图1 小电阻接地系统发生高阻接地故障时的电流分布图

Fig.1 Schematic diagram of current distribution when high impedance grounding fault occurs in low-resistance grounding system

由于中性点经小电阻接地,发生单相接地故障时会形成零序网络。考虑到过渡电阻较大,非故障线路的对地电容电流不应忽略。忽略绝缘电阻和线路阻抗,对应的零序网络如图2所示。图中,Z_0为接地变压器的零序阻抗,$\boldsymbol{I}_{0Z}$为接地变压器的零序电流。

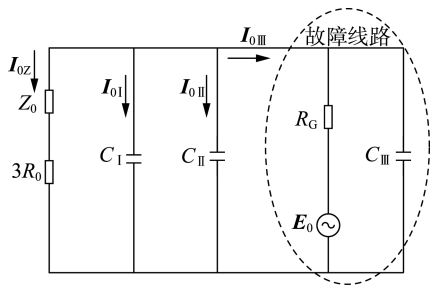

图2 零序等值网络图

Fig.2 Zero-sequence equivalent network

根据KCL可知,故障线路的零序电流$\boldsymbol{I}_{0Ⅲ}$为:

$$\boldsymbol{I}_{0Ⅲ}=-(\boldsymbol{I}_{0Ⅰ}+\boldsymbol{I}_{0Ⅱ}+\boldsymbol{I}_{0Z}) \tag{1}$$

其中,实际流过中性点的电流$\boldsymbol{I}_{R_0}$应为$\boldsymbol{I}_{0Z}$的3倍,即有:

$$\boldsymbol{I}_{R_0}=3\boldsymbol{I}_{0Z} \tag{2}$$

因此,故障线路的零序电流可表示为:

$$3\boldsymbol{I}_{0Ⅲ}=-(3\boldsymbol{I}_{0Ⅰ}+3\boldsymbol{I}_{0Ⅱ}+\boldsymbol{I}_{R_0}) \tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{I}_{R_0}$呈阻性;$3\boldsymbol{I}_{0Ⅰ}$、$3\boldsymbol{I}_{0Ⅱ}$为非故障线路的零序电流(忽略绝缘电阻和线路阻抗),基本呈容性;$3\boldsymbol{I}_{0Ⅲ}$为故障线路的零序电流。理想情况下,上述电流的相量关系如图3所示。

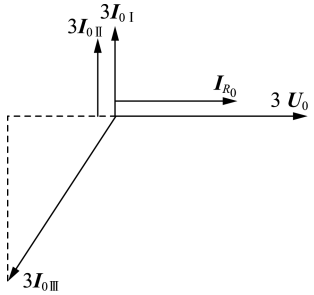

图3 发生高阻接地故障时各电流的相量示意图

Fig.3 Schematic diagram of current phasors when high impedance grounding fault occurs

从图3可以看出,由于非故障线路零序电流$3\boldsymbol{I}_{0Ⅰ}$、$3\boldsymbol{I}_{0Ⅱ}$基本呈容性,而中性点电流$\boldsymbol{I}_{R_0}$基本呈阻性,因此$3\boldsymbol{I}_{0Ⅰ}$、$3\boldsymbol{I}_{0Ⅱ}$在$\boldsymbol{I}_{R_0}$上的投影较小;故障线路零序电流$3\boldsymbol{I}_{0Ⅲ}$在$\boldsymbol{I}_{R_0}$上的投影的幅值与$\boldsymbol{I}_{R_0}$的幅值基本相等,方向相反。可见,故障线路零序电流和非故障线路零序电流在中性点电流上的投影有明显的不同,据此可以构成保护判据对高阻接地故障进行可靠检测。

高阻接地故障判据如式(4)所示。

$$I_d=|\boldsymbol{I}_{R_0}+\boldsymbol{I}_t|\leqslant I_z \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{I}_t$为线路零序电流在中性点电流上的投影;I_d为投影量和中性点电流的差动电流,对故障线路而言,差动电流值较小,接近于0,对于非故障线路而言,差动电流值较大,接近于中性点电流值;I_z为差动电流整定值,其取值原则为躲过各种不对称情况的影响。

差动电流整定值I_z的大小受各种不对称情况的影响较大,因此,为了进一步提高判据的灵敏度和可靠性,本文将式(4)修改为:

$$k=\frac{|\boldsymbol{I}_{R_0}-\boldsymbol{I}_t|}{I_d}\geqslant k_{set} \tag{5}$$

其中,k为中性点电流及投影量之差与本文定义的差动电流的比值;k_{set}为设置的门槛值。当发生高阻接地故障时,对于故障线路而言,k值在理论上趋于无穷大;对于非故障线路而言,k值不会很大,理论上接近1。由此可知,比值计算的方法使故障线路与非故障线路的差异明显,式(5)所示判据具有较高的可靠性。

对于高阻接地故障而言,零序电流往往较小,在确保判据可靠性的前提下,为了提高判据的灵敏度,本文以中性点电流为启动量,根据所需的抗过渡电

阻能力来确定门槛值。如果在某些特殊情况下,电流互感器的精度不高或者保护装置的最小工作电流值较高,则可根据输入电流的最小值确定抗过渡电阻能力,这样可兼顾电流互感器精度和保护装置的最小工作电流等条件的约束。传统的零序方向过流保护整定值的选取原则为躲过正常运行时的最大不平衡电流[17],由规程设置为电流互感器一次侧额定电流的 5%~10%,此为综合考虑了各种不平衡情况下的最保守的整定结果,可有效躲开各种不平衡状态,但对应的抗过渡电阻能力一般不超过 400 Ω[18]。可见,在发生高阻接地故障时,传统零序方向过流保护的灵敏度难以满足要求。

综上所述,本文所提方法的优点为:以中性点电流作为保护启动量,按照过渡电阻确定门槛值,确保了保护在发生高阻接地故障时的灵敏度;比值计算的方法使故障线路和非故障线路之间的差异明显,确保了保护的可靠性;此外,每个保护只需引入本线路的零序电流和中性点电流,无需引入零序电压和其他线路的电气量,具有良好的适用性和可靠性。

2　影响判据可靠性的因素分析

由于本文采用中性点电流作为启动量,除发生接地故障时会出现中性点电流,当系统出现电压不对称、线路参数不对称和负荷不平衡等情况时,中性点电压都可能偏移,从而出现中性点电流,各条出线也会产生零序电流,因此,需要对各种不对称情况是否影响本文所提判据的可靠性进行分析。

2.1　系统三相电压不对称

当系统三相电压不对称时会出现零序电压,中性点会出现电流,各条出线也会出现零序电流。通过上文分析可知,零序网络包括所有的线路,每条线路的零序电流中的阻性分量都不会很大,因此线路零序电流在中性点电流上的投影量不会很大,计算得到的差动电流与中性点电流基本相等,不会导致判据误判。

2.2　负荷不平衡

负荷不平衡是配电网的常见现象。配电网负荷分为高压负荷和低压负荷 2 类。

a. 低压负荷接在用户侧变压器的二次侧,当负荷不平衡时,用户侧变压器低压侧的相应线路会出现零序电流,但由于配电网变压器采用三角形接线,低压侧负荷不平衡产生的零序电流会在三角形接线的变压器绕组内形成环流,配电网侧感受不到低压侧的零序电流,因此不会对判据产生影响。

b. 高压负荷直接接在配电网上,如果负荷用等值阻抗表示,当负荷不平衡时,相当于配电线路相间阻抗参数不平衡,这与线路参数不对称的情况在本质上是类似的,因此将该种情况归到线路参数不对称的情形进行讨论。

2.3　线路参数不对称

配电网线路参数不对称主要指对地分布电容不对称,高压负荷不平衡主要是指相间阻抗参数不对称,二者属于同一类问题,且均可概括为 2 种情况:系统中只存在 1 条线路三相不对称和存在多条线路三相不对称。为了便于分析,以 A 相参数不对称为例,定义不对称度 m 如下:

$$m=|Z_{\mathrm{A}}-Z'_{\mathrm{A}}|/Z_{\mathrm{A}} \tag{6}$$

其中,Z_{A} 为参数对称时 A 相的标准参数;Z'_{A} 为参数不对称时 A 相的实际参数。m 的取值范围为(0,1),考虑参数不对称较为严重的情况,m 的取值一般不大于 0.3。

极端情况下假设只有 1 条线路参数严重不对称,此时,系统中性点电压发生偏移导致出现中性点电流 $\boldsymbol{I}_{R_0}$,不对称线路出现的零序电流在中性点电流上的投影与 $\boldsymbol{I}_{R_0}$ 大小基本相等、方向相反。然而,大量分析表明,当 $m=0.3$ 时,中性点电流远小于发生经过 3 kΩ 的过渡电阻接地故障时的中性点电流。因此,中性点电流门槛值以能够可靠检测到的高阻接地故障电流为基准,既能可靠躲过较为严重的单条线路参数不对称的影响,又能够保证本文保护方法的灵敏度和可靠性。

如果有多条线路参数不对称,当每条线路的不对称相别不同或不对称度较小时,系统可能呈现轻微不对称的效果,此时流过中性点电阻的电流 $\boldsymbol{I}_{R_0}$ 较小,可以通过中性点电流的门槛值躲过该影响。但若多条线路不对称导致中性点电流大于门槛值,则保护将会启动进入故障判断流程,根据零序电流的分布规律可知,每条线路的零序电流中都会包含一定的阻性分量,其大小取决于线路参数的 m 值。每条线路零序电流在中性点电流上的投影不会太大,对应式(5)所示判据的 k 值会大于 1,但不会趋于无穷大,因此可以通过设定门槛值 k_{set} 区分多条线路参数不对称和高阻接地故障。

不利的情况是在线路参数不对称情况下发生高阻接地故障,不对称线路和故障线路均会有阻性电流流过。此时对于故障线路而言,式(5)中的分母变大,对应的 k 值会减小。但故障线路与参数不对称线路的 k 值存在明显的区分度,因此通过设置合理的门槛值 k_{set} 完全可以可靠区分线路参数不对称和高阻接地故障。k_{set} 的取值取决于配电网具体结构和线路参数不对称情况。

3　高阻接地故障判断流程

小电阻接地配电网高阻接地故障的判断流程如下,具体流程图如附录中的图 A1 所示。

a. 以中性点电流 $\boldsymbol{I}_{R_0}$ 为启动量,启动门槛值的选择以发生高阻接地故障时具有足够灵敏度为基准,例如如果希望能够可靠检测经过 3 kΩ 过渡电阻的高阻接地故障,计算此时的中性点电流值,乘以 0.8 的可靠系数后即为启动电流;

b. 保护启动后,以中性点电流为参考量,计算线路零序电流在中性点电流 $\boldsymbol{I}_{R_0}$ 上的投影量 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{t}}$,根据式(4)计算差动电流 I_{d};

c. 将中性点电流值 $\boldsymbol{I}_{R_0}$、投影值 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{t}}$ 及差动值 I_{d} 代入式(5)求出 k 值,如果 $k>k_{\mathrm{set}}$,则认为发生了高阻接地故障,否则保护返回。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

本文采用 PSCAD 仿真软件搭建了如图 4 所示的 10 kV 配电网仿真模型。

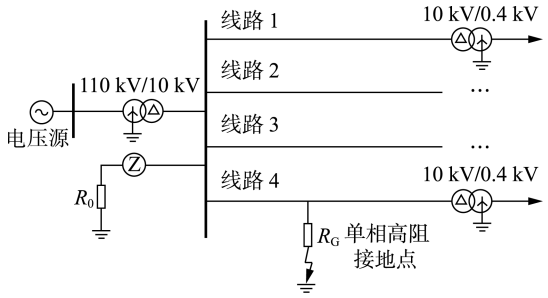

图 4 10 kV 配电网结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of structure of 10 kV distribution network

本文仿真中,线路采用 π 型集中参数模型,相关参数如下。

a. 正序参数为:R_1 = 0.094 Ω/km, L_1 = 0.209 mH/km, C_1 = 0.546 μF/km。

b. 零序参数为:R_0 = 0.234 Ω/km, L_0 = 0.355 mH/km, C_0 = 0.220 μF/km。

c. 线路 1—4 的长度均为 5 km,中性点接地电阻值为 10 Ω[19-20]。

4.2 仿真结果及与零序方向过流保护灵敏度的对比分析

假设线路 4 的 C 相发生经不同过渡电阻的高阻接地故障,故障点距离母线 2 km,设置仿真时间为 1 s,故障发生时刻为 0.2 s。

零序方向过流保护按照电流互感器一次侧额定电流的 5%~10%进行整定。经过仿真可知,发生单相金属性接地故障时线路零序电流为 269.7 A,设零序电流互感器的变比为 300 A/5 A,则零序电流的整定值为 15~30 A,可以计算出该整定值范围对应的过渡电阻值如表 1 所示。

由表 1 可以看出,对于常规的零序方向过流保护而言,即使采用最小的整定值 15 A,抗过渡电阻能力也仅为 375.5 Ω,难以应对过渡电阻大于 500 Ω 的高阻接地故障。

表 1 不同整定值对应的过渡电阻计算结果

Table 1 Calculation results of transition resistances under different setting values

一次电流整定值/A	抗过渡电阻能力/Ω
15	375.5
20	280.0
25	224.0
30	182.0

本文以可靠检测经 3 kΩ 过渡电阻的高阻接地故障为准,计算可得此时的中性点电流值为 1.91 A,乘以 0.8 的可靠系数后得到启动电流 I_{dz} = 1.528 A。以 1 kΩ 的过渡电阻为例,仿真得到故障线路的零序电流和中性点电流如图 5 所示。

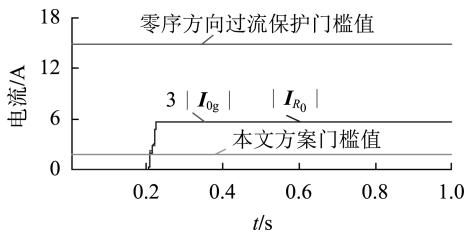

图 5 过渡电阻为 1 kΩ 时,故障线路的零序电流、中性点电流和保护门槛值

Fig.5 Zero-sequence current of faulty line, neutral point current and threshold value when transition resistance is 1 kΩ

从图 5 可以看出,当过电阻为 1 kΩ 时,故障线路的零序电流为 5.7 A,低于零序方向过流保护的整定值 15 A;中性点电流与故障线路零序电流大小相近,大于本文判据的启动门槛值 1.528 A,保护可靠启动。

故障线路和非故障线路的 k 值计算结果如图 6 所示。图中下标 g 代表故障线路,下标 f 代表非故障线路。

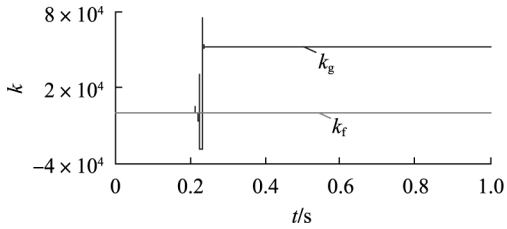

图 6 故障线路与非故障线路的 k 值

Fig.6 Values of k of faulty line and healthy line

从图 6 可以看出,故障线路的 k 值大于 5×10^4;非故障线路的 k 值接近 1,两者有明显的区分度,表明本文保护判据具有较高的可靠性。

令过渡电阻分别为 500 Ω、1 500 Ω、2 000 Ω 和 3 000 Ω,计算得到故障线路、非故障线路的 k 值及相关电流值如附录 B 中的表 B1 所示。

由表 B1 可见,当接地电阻在 500~3 000 Ω 范围内变化时,中性点电流和故障线路、非故障线路的零序电流都会发生变化,但 k 值的计算结果比较稳定,基本不随过渡电阻值的改变而变化,这表明本文所提判据的灵敏度受过渡电阻值的影响较小。

4.3　各种不对称情况下保护判据的可靠性验证

零序方向过流保护的整定值可躲过各种不对称的影响[21-22],因此不对称情况不会造成零序方向过流保护误动。下面通过仿真验证本文所提判据在各种不对称情况下是否会发生误动。

4.3.1　单条线路参数不对称

在只有 1 条线路参数不对称情况下,仿真得到 $\boldsymbol{I}_{R_0}$ 随不对称度 m 的变化曲线如图 7 所示。

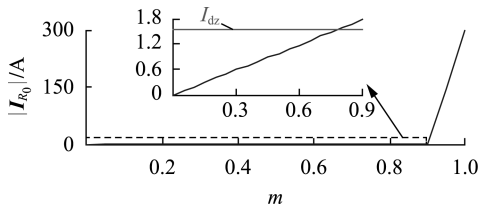

图 7　$|\boldsymbol{I}_{R_0}|$ 随 m 的变化曲线

Fig.7　Curve of $|\boldsymbol{I}_{R_0}|$ vs. m

由图 7 可知,当不对称度 m>0.78 时,中性点电流大于启动值 I_{dz}。实际系统中,单条线路的不对称度不允许大于 0.3,因此本文的启动电流门槛值能够可靠地躲过单条线路参数不对称的影响。

4.3.2　多条线路参数不对称

当多条线路参数不对称时,考虑极限情况,即每条线路的不对称相为同一相的情况,中性点电流大于启动值,保护启动故障判断,计算对应的 k 值。假设不对称相均为 C 相,线路 1、2、3、4 的不对称度分别为 0.3、0.25、0.2 和 0.1,此时 $|\boldsymbol{I}_{R_0}|$=1.69 A,k 值的计算结果如图 8 所示。

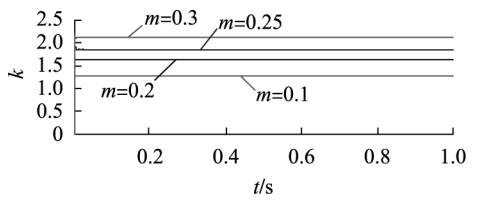

图 8　多条线路不对称情况下对应的 k 值

Fig.8　Values of k under asymmetry of multiple lines

从图 8 可以看出,即使每条线路的 m 值达到 0.3,对应的 k 值仅为 2.12,与发生高阻接地故障对应的 k 值仍有明显的区分度,保护不会误动。

4.4　线路参数不对称情况下发生高阻故障

考虑极端情况,令线路 3 不对称度 m=0.3,线路 4 的 C 相发生经不同过渡电阻的高阻接地故障,计算得到的 k 值如附录 A 中的图 A2 所示。

从图 A2 可知:在不对称和高阻接地故障同时存在时,故障线路的 k 值会减小,且过渡电阻越大,k 值越小;当过渡电阻达到 3 000 Ω 时,k 值接近 30,但仍远大于参数不对称线路对应的 k 值 1.41。因此,即使在最大不对称度的情况下,故障线路和不对称线路的 k 值仍有明显的区分度,本文所提保护判据仍具有较高的可靠性。

5　结语

本文提出了一种基于中性点电流与零序电流投影量差动原理的高阻接地故障判断方法,其具有以下特点:

a. 以中性点电流为启动量,按照过渡电阻来确定门槛值,确保高阻接地故障时具有足够的灵敏度;

b. 判据采用本线路零序电流和中性点电流构成,以中性点电流为参考轴,将线路零序电流向参考轴投影,很好地排除了对地电容电流的影响,无需零序电压,也无需其他馈线的电气量;

c. 判据采用比值计算的方法,使得故障线路和非故障线路之间的差异明显,具有较高的可靠性,且判据灵敏度受过渡电阻大小的影响较小;

d. 严重的参数不对称情况可能会给本文判据带来不利影响,但通过设置合理的中性点电流启动门槛值和比值门槛值可有效躲过多种参数不对称情况的影响,不会影响本文所提方法对高阻接地故障的判断。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 姜博,董新洲,施慎行. 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):67-74.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Experimental research on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):67-74.

[2] 薛永端,李娟,陈筱需,等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17):5037-5048.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17):5037-5048.

[3] 张文海,肖先勇,汪颖. 基于故障暂态信号及其衰减特征的配网单相接地故障测距[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):46-52.
ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, WANG Ying. Single-phase-to-ground fault location based on transient fault signal and its attenuation character for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):46-52.

[4] 宁国丽,房亚囡,邢立功,等. 小电阻接地系统中接地变压器零序电流保护改进[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):141-144.
NING Guoli, FANG Yanan, XING Ligong, et al. Improvement of zero-sequence over-current protection for grounding transformer in low-

resistance grounding power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):141-144.

[5] 喻磊,郭晓斌,韩博文,等. 小电阻接地系统馈线自适应零序电流保护原理及装置实现[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):125-131.
YU Lei,GUO Xiaobin,HAN Bowen,et al. Principle of adaptive zero-sequence current protection and implementation of its device for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):125-131.

[6] 王仕洪. 东莞10 kV电网小电阻接地系统零序保护不正确动作的探究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
WANG Shihong. Discussion of incorrect action of zero-sequence current protection in low resistance grounding system in Dongguan 10 kV Power Grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2011.

[7] 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.

[8] 郭谋发,林妙玉,杨耿杰. 谐振接地系统暂稳态信息智能融合选线方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(7):60-66.
GUO Moufa,LIN Miaoyu,YANG Gengjie. The transient and steady-state information fusion method for single phase grounding line detection in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control,2013,41(7):60-66.

[9] 张慧芬,潘贞存,田质广,等. 一种中低压配电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术,2005,29(3):76-80.
ZHANG Huifen,PAN Zhencun,TIAN Zhiguang,et al. A new principle to detect single phase grounding feeder in middle and low voltage distribution networks[J]. Power System Technology,2005,29(3):76-80.

[10] LIEN K,CHEN S,LIAO C,et al. Energy variance criterion and threshold tuning scheme for high impedance fault detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(3):810-817.

[11] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):6-11.
ZENG Xiangjun,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(4):6-11.

[12] 唐轶,陈奎,陈庆,等. 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(6):49-54.
TANG Yi,CHEN Kui,CHEN Qing,et al. Study on earthed fault location method in indirectly grounding power system using maximum value of absolute value summation of measurement admittance mutual difference[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(6):49-54.

[13] 姚李孝,赵化时,柯丽芳,等. 基于小波相关性的配电网单相接地故障测距[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):71-75.
YAO Lixiao,ZHAO Huashi,KE Lifang,et al. Single-phase grounding fault locating based on wavelet correlation for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):71-75.

[14] 李泽文,周卿松,曾祥君,等. 基于行波模量传输时差的配电网接地故障定位新方法[J]. 中国电力,2015,48(9):67-72.
LI Zewen,ZHOU Qingsong,ZENG Xiangjun,et al. New fault location method based on time difference of traveling wave mode-component in distribution network[J]. Electric Power,2015,48(9):67-72.

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

[16] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):70-75.
WU Lepeng,HUANG Chun,LIN Dabin,et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):70-75.

[17] 中华人民共和国发展和改革委员会. 3 kV~110 kV电网继电保护装置运行整定规程:DL/T 584—2007[S]. 北京:中国电力出版社,2007.

[18] 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.
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.

[19] 高亚栋,杜斌,赵峰,等. 中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J]. 高压电器,2004,40(5):345-348.
GAO Yadong,DU Bin,ZHAO Feng,et al. Study on arc-grounding overvoltage in the distribution system with neutral point grounded through low-resistance[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(5):345-348.

[20] 李朝晖,段绍辉,郑志锫. 中性点小电阻接地配电网单相接地故障人身安全性试验研究[J]. 电力自动化设备,2001,21(9):40-42.
LI Zhaohui,DUAN Shaohui,ZHENG Zhikeng. Research on human safety test under single phase grounding fault of distribution network with neutral point resistor grounding[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(9):40-42.

[21] 李谦,赵东生,肖磊石,等. 广东电网小电流接地系统中性点接地方式优化对策[J]. 广东电力,2017,30(12):124-129.
LI Qian,ZHAO Dongsheng,XIAO Leishi,et al. Optimization measures for neutral point grounding mode of small current grounding system of Guangdong Power Grid[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(12):124-129.

[22] 喻磊,郭晓斌,韩博文,等. 小电阻接地系统馈线自适应零序电流保护原理及装置实现[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):131-137.
YU Lei,GUO Xiaobin,HAN Bowen,et al. Principle of adaptive zero-sequence current protection and implementation of its device for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):131-137.

作者简介:

盛亚如

盛亚如(1993—),女,山东成武人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:yarushengsdu@163.com);

丛 伟(1978—),男,山东文登人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:weicong@sdu.edu.cn)。

(下转第29页 continued on page 29)

作者简介:

薛安成

薛安成(1979—),男,江苏常熟人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为模型和数据驱动的新能源电力系统稳定性分析和安全控制(**E-mail**:acxue@ncepu.edu.cn);

王子哲(1995—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制(**E-mail**:hdwangzz@ncepu.edu.cn);

吴　雨(1994—),男,山西晋城人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析(**E-mail**:flutewuyu@163.com);

李景一(1990—),男,辽宁丹东人,博士,主要研究方向为新能源电力系统次同步振荡分析与控制(**E-mail**:ljy510647583@163.com);

毕天姝(1973—),女,河南济源人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与控制、广域同步相量测量技术及其应用(**E-mail**:tsbi@ncepu.edu.cn)。

Frequency distribution and amplitude characteristic of electric flux for grid-connected voltage source converter under subsynchronous disturbance

XUE Ancheng, WANG Zizhe, WU Yu, LI Jingyi, BI Tianshu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the case that multi-frequency components exists in the voltage response of the converter under subsynchronous voltage disturbances, the characteristics of the frequency distribution and the magnitude in the response are theoretically derived based on the method of the dynamic response analysis with two-order approximation. More specifically, with the two-order perturbation, the frequency distribution and amplitude characteristics of the response for PLL(Phase-Locked Loop) and current inner-loop controller under the subsynchronous voltage disturbance are firstly derived. Subsequently, the difference and similarity of the proposed method with respect to the traditional small signal analysis are discussed. Simulative results indicate that, under the subsynchronous voltage disturbance, the voltage response of the converter at the terminal of PCC(Point of Common Coupling) that is connected to the external power grid includes not only a pair of complementary sub/supersynchronous frequency components, but also a series of complementary small amplitude frequency components. Besides, the amplitude of the largest complementary sub/supersynchronous frequency components is directly related to integral parameters, while is insensitive to other parameters. Simulative results generally coincide with theoretical results.

Key words: sub/supersynchronization; multiple-frequency distribution characteristic; voltage source converter; control parameters; dynamic response

(上接第 22 页 continued from page 22)

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

SHENG Yaru[1], CONG Wei[1], BU Xianghai[2], LI Xiaoming[1]

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: Based on the analysis of the vector relation between the neutral point current and zero-sequence current of faulty and normal lines, a detection method of high impedance grounding fault based on the differential current of zero-sequence current projection and neutral point current is proposed. As grounding fault occurs, the fault line passes through grounding point and neutral point of the system to form a basic zero-sequence circuit. Because the neutral point current is resistive, the difference between the projection of zero-sequence current of fault line on neutral point current and the neutral point current is small. However, the zero-sequence current of non-fault line is capacitive, so the difference between the projection of zero-sequence current of non-fault line on neutral point current and the neutral point current is large. Therefore, the ratio method is introduced to detect high impedance grounding fault effectively. Then a further investigation is made about the effects of asymmetric line parameters, asymmetric load and asymmetric voltage of the system on the presented method. Simulative results by PSACD proves that the presented method can reliably detect high resistance grounding fault, which is less affected by various asymmetric conditions, and has high sensitivity and reliability.

Key words: low-resistance grounding distribution network; high impedance grounding fault; current projection; current difference

附录 A

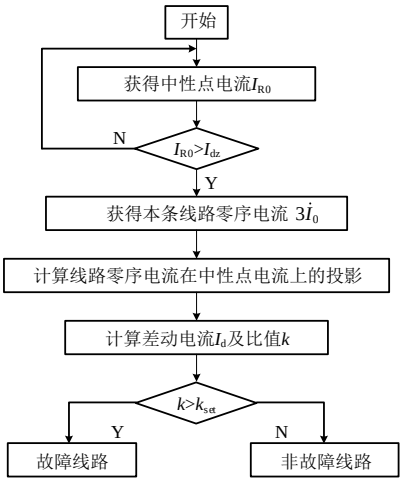

图 A1 高阻接地故障判断流程图

Fig.A1 Flowchart of judgment of high impedance grounding fault

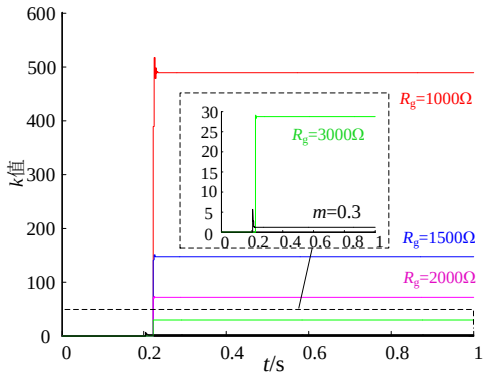

图 A2 *m*=0.3 时，不同过渡电阻情况下故障线路与不对称线路的 *k* 值对比图

Fig.A2 *k* value of faulty line and asymmetrical line under different transition resistances when *m* =0.3

附录 B

表 B1 不同过渡电阻下的仿真结果

Table B1 Simulation results under different transition resistance

R_G/Ω	中性点电流/A	零序电流/A		投影/A		$\lvert \boldsymbol{I}_{R0}-\boldsymbol{I}_t \rvert$/A		$\lvert \boldsymbol{I}_{R0}+\boldsymbol{I}_t \rvert$/A		k	
		故障线路	非故障线路	故障线路	非故障线路	故障线路	非故障线路	故障线路	非故障线路	故障线路	非故障线路
500	11.2762	11.2902	0.1867	11.2757	0.0002	22.5519	11.2764	0.0005	11.2760	45104	1.0000
1500	3.8059	3.8106	0.0630	3.8057	0.0001	7.6116	3.8060	0.0002	3.8058	38058	1.0000
2000	2.8578	2.8614	0.0473	2.8577	0.00004	5.7155	2.85784	0.0001	2.85776	57155	1.0000
3000	1.9066	1.9089	0.0316	1.9065	0.00003	3.8131	1.90663	0.0001	1.90657	42367	1.0000