

基于导纳不对称原理的小电流接地系统选线方案

韦莉珊, 贾文超, 焦彦军

(华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要:为了解决目前仍然存在的小电流接地系统单相接地故障选线难的问题,提出了一种运用导纳不对称参数作为判据的故障选线方案。该方案借鉴了主动保护的思想,通过并联中电阻改变中性点经消弧线圈接地系统故障后的结构,找出故障线路与非故障线路的导纳不对称参数差异。所构造的不对称参数可以衡量线路的导纳不对称程度,理论分析以及PSCAD仿真结果表明:健全线路的导纳不对称度为0,故障线路导纳不对称度不为0且大于1,通过两者差异可以实现准确选线。该方案无需设置动作门槛,灵敏性较高,且导纳不对称参数理论上不受过渡电阻影响。

关键词:小电流接地系统;故障选线;导纳不对称度;中电阻

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003013

0 引言

我国中低压配电网的中性点一般采用不接地和经消弧线圈接地2种方式,称为小电流接地系统。由于小电流接地系统发生单相接地故障尤其是高阻接地故障时故障电流很小,因此小电流接地系统的故障选线问题一直困扰着学者。目前已有较多的选线理论和算法,主要包括:基于稳态信号的选线方法^[1-3],其中5次谐波法虽然不受消弧线圈的影响,但谐波含量过小,灵敏度受到很大的限制;基于暂态信号的选线方法^[4-6]故障特征明显,但暂态过程短,且受线路结构、参数及故障条件的影响;注入式选线方法^[7]通过外加设备对系统注入信号实现选线,可靠性高,但需要额外设备,增加了成本;随着电力电子技术的发展,主动式选线方法也得到了进一步的研究,主要包括中电阻法^[8]、小扰动法^[9]等,其中利用零序电流幅值或有功分量的中电阻法扩大了故障线路和非故障线路的故障特征差异,但理论上仍受过渡电阻的影响。

考虑到系统发生单相接地故障时故障线路结构将发生明显变化,可以利用系统结构的变化特征构造选线判据。已有学者从故障后系统结构变化的角度出发设计了保护方案:文献[10]通过调节消弧线圈电感,利用调节前后的特征参数变化量选出故障线路,但只能运用在中性点经消弧线圈接地的系统中;文献[11]定义了元件的导纳不对称度参数,根据发生区内故障时故障元件的导纳不对称度远大于非故障元件的导纳不对称度这一特征实现了扩大单元

接线发电机定子接地故障的选择性动作;文献[12]对相不对称度进行了定义,分析了中性点外加入信号后的线路导纳不对称度变化,实现了故障选相,但仍需要与其他方法配合选线;文献[13-14]通过零序电压与零序电流的测量量计算故障后各线路对地电阻大小从而区分故障线路。

针对上述情况,本文在分析线路导纳不对称度的基础上构建了故障线路和非故障线路的特征差异,并结合主动式保护的思想提出一种灵敏度高且能消除过渡电阻影响的单相接地故障选线方案。该方案原理简单、灵敏度高,且理论上不受过渡电阻影响。

1 导纳不对称参数

在电网正常运行情况下,小电流接地系统的简化等值电路图如图1所示。图中, E_A 、 E_B 、 E_C 为系统三相电源; U_A 、 U_B 、 U_C 为母线三相电压; U_0 为零序电压; C_{A0i} 、 C_{B0i} 、 C_{C0i} 为线路 i ($i=1,2,\dots,m$)的零序三相

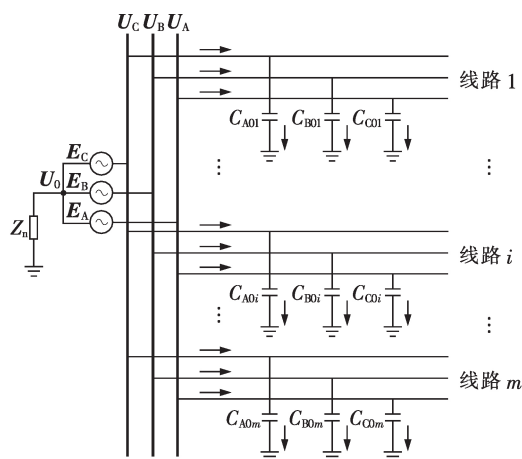


图1 小电流接地系统等值电路图

Fig.1 Equivalent circuit of small current grounding system

收稿日期:2019-05-07;修回日期:2020-01-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016-MS87)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016MS87)

对地电容; Z_n 为中性点接地阻抗, $Z_n=\infty$ 表示中性点不接地系统。考虑到电气线路三相对地容抗远小于泄漏电阻,并且线路阻抗远小于对地容抗,因此可以忽略线路的三相对地电导以及线路阻抗,仅考虑线路对地电容的作用。

正常运行时线路*i*的三相对地电流 I_{Ai} 、 I_{Bi} 、 I_{Ci} 如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_{Ai} = (U_0 + E_A) j\omega C_{A0i} \\ I_{Bi} = (U_0 + E_B) j\omega C_{B0i} \\ I_{Ci} = (U_0 + E_C) j\omega C_{C0i} \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω 为角频率。

根据式(1)得到线路*i*的零序电流 $3I_{0i}$ 为:

$$3I_{0i} = 3j\omega C_{0i} \left(U_0 + \frac{C_{A0i} + a^2 C_{B0i} + a C_{C0i}}{C_{A0i} + C_{B0i} + C_{C0i}} E_A \right) \quad (2)$$

其中, $C_{0i}=(C_{A0i}+C_{B0i}+C_{C0i})/3$; $a=e^{j120^\circ}$ 为旋转因子。定义:

$$K_{i|0|} = \left| \frac{C_{A0i} + a^2 C_{B0i} + a C_{C0i}}{C_{A0i} + C_{B0i} + C_{C0i}} \right| \quad (3)$$

则 $K_{i|0|}$ 称为正常运行时线路*i*的导纳不对称度。

根据式(2)得到正常运行情况下线路的导纳不对称度的测量表达式为:

$$K'_{i|0|} = \left| \frac{3I_{0i} - 3j\omega C_{0i} U_0}{3j\omega C_{0i} E_A} \right| \quad (4)$$

在实际电力系统中,正常运行时架空线路的导纳不对称度为0.5%~1.5%,其理论极限值达到3.5%^[15],电缆线路的不对称程度相较于架空线路要小。因此在后续分析中本文假设线路三相对地电容相等,即 $C_{0i}=C_{A0i}=C_{B0i}=C_{C0i}$ 。

借鉴式(4),本文定义用于衡量线路*i*的导纳不对称程度的参数 $\tilde{K}_i$,并令其测量表达式为:

$$\tilde{K}_i = \left| \frac{3I_{0i} - 3j\omega C_{0i} U_0}{3j\omega C_{ref} U_0} \right| \quad (5)$$

式(5)是在式(4)的基础上将分母中的 E_A 替换为 U_0 得到的, C_{0i} 取对地电容实测值, C_{ref} 为参考电容,本文拟定为最长线路的三相对地电容。

2 小电流接地系统的故障特征分析

2.1 中性点不接地系统的导纳不对称度

对于中性点不接地系统($Z_n=\infty$),如果图1中某条线路*f*的A相经电阻 R_f 接地,用 C_{0i} 与 C_{0f} 分别表示非故障线路*i*与故障线路*f*的各相对地电容,对非故障线路与故障线路的导纳不对称度参数进行理论分析。

(1)非故障线路的导纳不对称度参数。

线路*f*的A相经电阻 R_f 接地时,非故障线路*i*的三相对地电流同式(1),其零序电流 $3I_{0i}$ 为:

$$3I_{0i} = I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci} = 3j\omega C_{0i} U_0 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)求出非故障线路*i*的导纳不对称度参数 $\tilde{K}_i$ 为:

$$\tilde{K}_i = \left| \frac{3j\omega C_{0i} U_0 - 3j\omega C_{0i} U_0}{3j\omega C_{ref} U_0} \right| = 0 \quad (7)$$

(2)故障线路的导纳不对称度参数。

根据图1可知故障线路的零序电流等于所有健全线路对地电容电流之和,且其方向与健全线路零序电流方向相反,则故障线路*f*的零序电流 $3I_{0f}$ 如式(8)所示。

$$3I_{0f} = -3j\omega \sum_{i=1, i \neq f}^m C_{0i} U_0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)求出故障线路*f*的导纳不对称度参数 $\tilde{K}_f$ 为:

$$\tilde{K}_f = \left| \frac{-3j\omega \sum_{i=1, i \neq f}^m C_{0i} U_0 - 3j\omega C_{0f} U_0}{3j\omega C_{ref} U_0} \right| = \left| \frac{\sum_{i=1}^m C_{0i}}{C_{ref}} \right| \quad (9)$$

比较式(7)和式(9)的理论分析结果可以得到以下结论。

(1)故障后非故障线路的导纳不对称度参数 $\tilde{K}_i=0$,而故障线路的导纳不对称度参数 $\tilde{K}_f$ 为大于1的常数,数值上等于系统总对地电容与参考电容的比值,与 $\tilde{K}_i$ 存在明显差异。当各条线路单位长度的对地电容相同时, $\tilde{K}_f$ 即为系统线路总长度与参考长度的比值。

(2)故障线路的导纳不对称度参数理论上不受过渡电阻的影响。

根据这一数值差异,在单相接地故障发生后,通过比较各线路的导纳不对称度参数的大小即可实现故障选线。

2.2 中性点经消弧线圈接地系统的导纳不对称度

对于中性点经消弧线圈接地系统($Z_n=j\omega L_n$, L_n 为消弧线圈电感),发生故障前由于系统对称,消弧线圈对各线路的导纳不对称度参数没有影响,各条线路的导纳不对称度参数均为0。当系统发生单相接地故障后,非故障线路的零序电流同式(6),故障线路的零序电流 $3I_{0f}$ 由所有健全线路的零序电流与流经中性点消弧线圈的电流叠加而成,如式(10)所示。

$$3I_{0f} = -3j\omega \sum_{i=1, i \neq f}^m C_{0i} U_0 - \frac{U_0}{j\omega L_n} \quad (10)$$

将非故障线路和故障线路的零序电流分别代入式(5)求出 $\tilde{K}_i$ 与 $\tilde{K}_f$:

$$\tilde{K}_i = \left| \frac{3j\omega C_{0i} U_0 - 3j\omega C_{0i} U_0}{3j\omega C_{ref} U_0} \right| = 0 \quad (11)$$

$$\tilde{K}_f = \left| \frac{\left(-3j\omega \sum_{i=1, i \neq f}^m C_{0i} - \frac{1}{j\omega L_n} \right) U_0 - 3j\omega C_{0f} U_0}{3j\omega C_{ref} U_0} \right| = \left| \frac{\nu \sum_{i=1}^m C_{0i}}{C_{ref}} \right| \quad (12)$$

$$\nu = \frac{3 \sum_{i=1}^m \omega C_{0i} - \frac{1}{\omega L_n}}{3 \sum_{i=1}^m \omega C_{0i}} \quad (13)$$

其中, ν 为脱谐度。

显然, 当消弧线圈完全补偿零序电容电流, 即 $\nu=0$ 时, 有:

$$\tilde{K}_f = \left| \frac{0}{C_{ref}} \right| = 0 \quad (14)$$

即在全补偿情况下健全线路与故障线路的导纳不对称度参数均为0, 此时该特征量作为选线判据失效。

在消弧线圈处于过补偿或欠补偿的情况下时, 考虑到电力系统脱谐度一般为5%~10%, 尽管此时 $\tilde{K}_f \neq 0$, 但分母减小, 其特征参数将变为系统中性点不接地时同一条线路故障导纳不对称度的5%~10%, 与非故障线路导纳不对称度的故障差异减小。若再考虑互感器误差以及其他不利因素, 有可能造成判据失效, 因此需加以改进。

2.3 并联中电阻的导纳不对称参数选线方法

随着国家对智能配电网建设的进一步推进, 先进电力电子技术和快速开关的研究逐渐实现了配电网故障快速识别和处理的功能, 这也使得中电阻的快速投切成为可能^[16]。系统在中性点投入并联中电阻后, 将产生消弧线圈难以抵消的较大有功分量, 且几乎全部经过故障线路, 而正常线路基本不受影响, 有效地增大了故障线路和非故障线路在零序电流上的幅值差异。

因此, 为了解决中性点经消弧线圈接地系统中上述判据失效的问题, 本文借鉴了主动保护的思想, 通过消弧线圈并联电阻改进选线方案, 如图2所示。

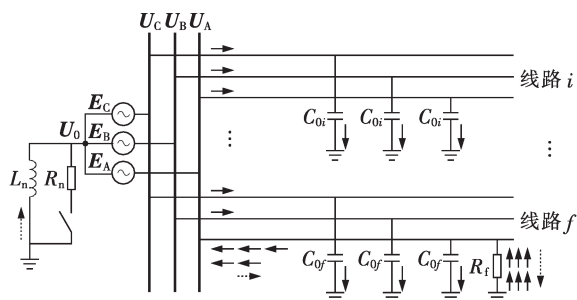


图2 并联中电阻的谐振接地系统等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit of resonant grounding system with paralleled medium resistance

发生故障后, 在中电阻投入前故障线路与非故障线路的导纳不对称度参数分别如式(11)和式(12)所示, 投入中电阻 R_n 后故障线路的零序电流变为:

$$3I_{0f} = -3j\omega \sum_{i=1, i \neq f}^m C_{0i} U_0 - \frac{U_0}{j\omega L_n} - \frac{U_0}{R_n} \quad (15)$$

此时非故障线路的导纳不对称度不变, 将式(15)代入式(5)得到故障线路的导纳不对称度参数为:

$$\tilde{K}_f = \left| \frac{\left(-3j\omega \sum_{i=1, i \neq f}^m C_{0i} - \frac{1}{j\omega L_n} - \frac{1}{R_n} \right) U_0 - 3j\omega C_{0f} U_0}{3j\omega C_{ref} U_0} \right| = \left| \frac{\nu \times 3j\omega \sum_{i=1}^m C_{0i} + \frac{1}{R_n}}{3j\omega C_{ref}} \right| \quad (16)$$

由此可见, 在投入中电阻期间, 线路的导纳不对称参数相较于未投入中电阻前会有一定程度的增大, 增大的幅度主要与 $1/(3R_n\omega C_{ref})$ 有关, 而架空线路的对地电容通常数量级较小, 因此故障线路的导纳不对称度的增大幅度将非常明显。实际上, 该算法可以与任何能够增大故障线路与非故障线路差异的方法配合使用。

3 基于导纳不对称度参数的选线方案

正常运行时, 安装在系统变电站中的选线装置实时监测系统三相电压以及各条线路检测点处的三相电流, 借助三相电压、电流的基波合成对应的零序分量, 或通过零序电压互感器和零序电流互感器采集零序分量。发生单相接地故障时, 利用导纳不对称度参数进行选线的保护方案如下。

(1) 启动元件设计。发生单相接地故障时全周零序电压升高, 零序电压超过15%的相电压时保护装置判定系统出现故障, 对应的电压互感器开口三角门槛电压 $U_{set} = 15 \text{ V}$ 。对于中性点不接地系统, 从零序电压越限时刻开始启动选线装置。对于中性点经消弧线圈接地系统, 如果为瞬时性故障, 则电弧将被消弧线圈熄灭, 故障自动消除, 消弧线圈控制装置不会进行选线; 如果2~5 s (该时间可设定) 后故障仍然存在, 则选线装置启动, 短时投入中电阻, 投入后0.2 s退出。

(2) 选线判据: 利用测量量直接计算各条线路的导纳不对称参数, 当导纳不对称参数的最大值大于门槛值时, 综合比较得出导纳不对称度最大的线路为故障线路, 否则判定为母线故障。由式(16)可知, 中性点经消弧线圈接地系统, 故障线路的导纳不对称度大于 $1/(3R_n\omega C_{ref})$, 选取门槛值为:

$$\tilde{K}_{th} = 0.5 \times \frac{1}{3R_n \omega C_{ref}} \quad (17)$$

中性点不接地系统的门槛值则按照式(9)取值的1/2选取。

选线具体流程如图3所示。

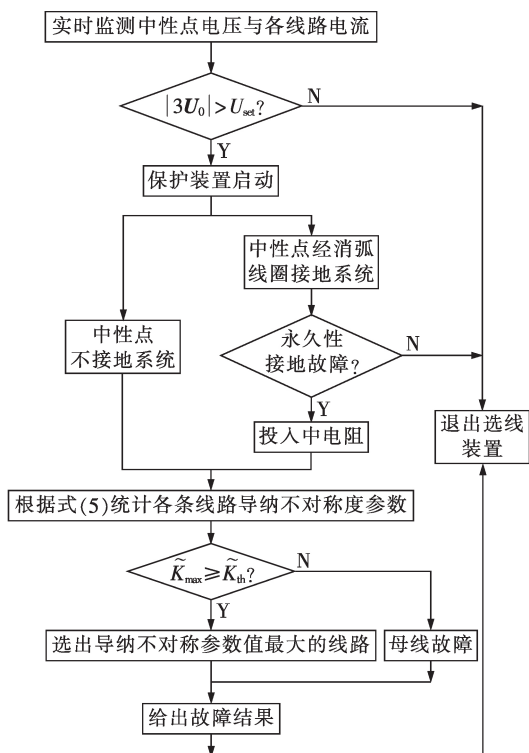


图3 基于导纳不对称参数的选线方案流程

Fig.3 Flowchart of line selection scheme based on admittance asymmetry parameter

对于健全线路,理论上其导纳不对称参数为0或接近于0,即使考虑到测量误差的存在,由于导纳不对称参数使用绝对值作为衡量,因此测量的相位误差也不会对导纳不对称参数的计算产生很大影响。即使系统在正常运行时,由于某些原因导致不对称电压异常升高,此时选线装置启动,但各条线路仍满足导纳不对称参数等于0或接近0的情况,保证保护装置不误动。

综上所述,本文方案有如下特性:无需设置保护动作门槛,通过比较各条线路的导纳不对称参数大小即可实现故障选线,故障特征差异明显;将电流相位和幅值作为比较判据的方式转变为数值大小的比较,0与非0值的差异使得算法具有较高的灵敏性,具有较强的抗过渡电阻能力;测量量容易获得,无需增加额外测量装置。

装置中的线路对地电容值可以直接在保护装置中设定。考虑线路实际运行参数与设计参数存在一定偏差,保护投运前可先进行线路对地电容的测量,并用该实测值对 C_{0i} 进行整定^[17-18]。

4 仿真验证

4.1 仿真模型

利用PSCAD仿真软件建立如图4所示的35 kV配电系统模型。

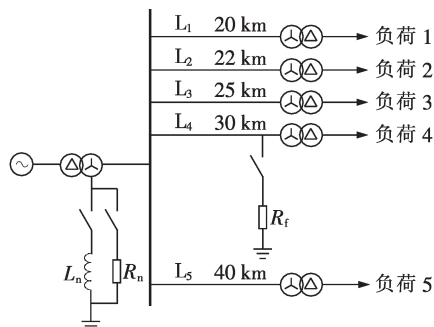


图4 35 kV配电系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of 35 kV distribution system

图4所示系统线路采用集中参数的 π 型等值电路模型,共有5条出线 L_1-L_5 ,各线路的长度如图4所示,线路单位长度具体参数设置为:正序电阻为 $0.17 \Omega/\text{km}$,正序电感为 $1.21 \text{ mH}/\text{km}$,正序电容为 $9.12 \text{ nF}/\text{km}$;零序电阻为 $0.23 \Omega/\text{km}$,零序电感为 $5.475 \text{ mH}/\text{km}$,零序电容为 $6.01 \text{ nF}/\text{km}$ 。故障发生在 L_4 距离母线15 km处,通过改变系统中性点开关状态,分别模拟系统中性点不接地和中性点经消弧线圈接地时发生单相经不同过渡电阻接地故障的情况,故障电阻取值分别为 0.001 、 100 、 1000 、 5000Ω 。

4.2 中电阻的取值

目前对于中电阻的阻值范围以及定义并没有统一的标准,但众多学者普遍认为中电阻的阻值选取应满足2个条件:并联中电阻后仍然能够提供相对明显的信号;但是不过分扩大故障电流,防止接地点电弧重燃^[19]。因此一般要求将接地点电流限制在10 A以内,有利于系统消弧。

在脱谐度已经确定的情况下,金属性接地故障的接地点电流最大,此时接地点电流幅值为:

$$|3I_{0f}| = \left| E_A \left(3j\nu \sum_{i=1}^m \omega C_{0i} + \frac{1}{R_n} \right) \right| \quad (18)$$

由此可见,接地点电流与脱谐度及中电阻值都有关,一般系统的脱谐度为5%~10%,为使中电阻阻值的设置能满足系统在脱谐度变化时接地点电流不超过10 A的条件,中电阻的取值应满足:

$$E_A \sqrt{\left(3\nu \sum_{i=1}^m \omega C_{0i} \right)^2 + \frac{1}{R_n^2}} \leq 10 \text{ A} \Rightarrow R_n \geq 2045 \Omega (\nu = 10\%) \quad (19)$$

估计中电阻取 2050Ω 时能满足故障电流的要求。

4.3 仿真结果分析

4.3.1 中性点不接地系统

设置图4中的中性点开关均为断开状态,在过渡电阻值为0.001、100、1 000、5 000 Ω 的情况下,根据收集到的零序电压和各条线路的零序电流计算单相接地故障发生前后各条线路的导纳不对称度参数,得到的统计结果见附录中的表A1。

从表A1和理论分析结果可以得出以下结论:

(1)中性点不接地系统中发生故障后,故障线路的导纳不对称参数约为3.425,而健全线路的导纳不对称参数为 10^{-3} 数量级,接近0,两者具有明显差异;

(2)故障线路导纳不对称度参数等于系统线路全长与参考线路长度的比值;

(2)在过渡电阻由0变化到5 000 Ω 的过程中故障线路的导纳不对称参数没有明显变化。

4.3.2 中性点经消弧线圈接地系统

闭合中性点消弧线圈开关,调节中性点消弧线圈的电感分别模拟系统脱谐度为0与-10%时系统发生经不同过渡电阻接地故障的情况。中电阻在正常运行时为断开状态,单相故障后延时一段时间投入中电阻,计算并统计各条线路在中电阻投入前、后的导纳不对称度参数,仿真结果见附录中的表A2。将表A2和理论分析结果进行比较可以看出:

(1)中性点经消弧线圈接地系统在全补偿情况下故障线路与健全线路导纳不对称度参数均接近于0,故障差异完全消失;

(2)对于过补偿状态下的系统,未投入中电阻时,故障线路的导纳不对称度参数与系统中性点不接地时同一条线路故障的导纳不对称度参数之比为 $|k|$,其与健全线路的差异缩小,虽然从仿真结果来看仍然大于非故障线路的导纳不对称度参数,但由于两者数量级相近,再考虑到实际系统中互感器误差和保护装置的识别精度等不利因素,判据很有可能失效;

(3)在投入中电阻的短时间内,全补偿系统故障线路的 $\tilde{K}$ 参数由0.01增加到2.157左右,过补偿系统故障线路的导纳不对称度参数由0.338增加到2.183,而非故障线路的导纳不对称度参数仍然接近0,差距非常可观,可以正确识别出故障线路;

(4)随着过渡电阻增大,故障线路的导纳不对称度参数没有明显变化,说明本文方案有很强的抗过渡电阻能力。

4.3.3 计及分布电容的仿真分析

考虑到实际运行中线路三相对地电容可能不对称的情况,设置所有线路C相对地电容 $C_{C0i}=1.1C_{A0i}=1.1C_{B0i}$,装置整定电容值保持原整定值不变,对过渡电阻值为0.001 Ω 和5 000 Ω 时不同类型系统的导纳不对称度参数进行仿真计算,得到的统计结果见附录中的表A3。

将表A3与表A2进行对比可以看出,考虑到实际运行电容与装置中的整定电容有偏差时,本文方案仍能实现可靠选线。

5 结论

针对单相接地故障选线难的问题,本文在线路参数不对称度的基础上定义一种导纳不对称度参数,并借鉴主动保护的思想,提出一种新的单相接地故障保护算法。

理论分析结果和PSCAD仿真结果表明:该算法能适用于各种中性点接地方式;与现有的中电阻法相比,非故障线路与故障线路的导纳不对称度特征差异是0与较大非0值的差别,灵敏性较高;且导纳不对称度参数的计算理论上不受过渡电阻的影响,可在一定程度上弥补中电阻法易受过渡电阻影响的缺陷。但发生高阻接地故障时零序电流信号的精确提取是应用该原理的关键问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张林利,高厚磊,徐丙垠,等.基于区段零序导纳的小电流接地故障定位方法[J].电力系统自动化,2012,36(20):94-98.
ZHANG Linli,GAO Houlei,XU Bingyin,et al. Fault location method based on zero-sequence admittance of sections in non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(20):94-98.
- [2] 陈志亮,范春菊.基于5次谐波突变量的小电流接地系统选线[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(5):37-41.
CHEN Zhiliang,FAN Chunju. Fault line selection for small current neutral grounding system based on the fifth harmonic current mutation in distribution system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2006,18(5):37-41.
- [3] 齐郑,刘宝柱,王璐,等.广域残流增量选线方法在辐射状谐振接地系统中的应用[J].电力系统自动化,2006,30(3):84-88.
QI Zheng,LIU Baozhu,WANG Lu,et al. Application of wide-area remnant increment method of line detection in radial neutral-point resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(3):84-88.
- [4] 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.
- [5] 张新慧,潘馨雨,何柏娜,等.基于暂态主频零模电流的故障选线仿真研究[J].计算机仿真,2013,30(10):157-161.
ZHANG Xinhui,PAN Xinyu,HE Bona,et al. Single-phase-to-earth fault detection simulation for non-effectively earthed network based on dominant transient frequency current[J]. Computer Simulation,2013,30(10):157-161.
- [6] RAFINIA A,MOSHTAGH J. A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS[J]. Electrical Power & Energy Systems,2014,55:261-274.
- [7] 严干贵,李果雪,张正茂,等.基于扫频法配电网电容电流测量装置研制[J].电力自动化设备,2007,27(3):64-68.

- YAN Gangui, LI Guoxue, ZHANG Zhengmao, et al. Development of capacitive current measuring instrument based on frequency scanning method for power distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3): 64-68.
- [8] 史如新. 基于中电阻投切的小电流接地系统故障选线技术研发[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- SHI Ruxin. Research and development of fault line selection technology for low-current grounding system based on middle resistance switching[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [9] 朱珂, 王怡轩, 倪建. 主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 189-196.
- ZHU Ke, WANG Yixuan, NI Jian. Application of active interference technology in fault selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 189-196.
- [10] 江渝, 冉立, 刘和平, 等. 可调节消弧线圈接地系统单相接地故障的辨识和选线[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 101-107.
- JIANG Yu, RAN Li, LIU Heping, et al. Judgement of the grounding fault and fault line selection for resonant network with adjustable arc suppression coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 101-107.
- [11] 贾文超, 黄少锋. 扩大单元接线发电机组定子接地保护的选择性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4941-4949.
- JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Research on the selectivity of stator-ground fault protection of generators in expanded unit connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4941-4949.
- [12] SAGATABETI K J, ZAMORA I, MAZONA A J, et al. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase earth faults in compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2251-2258.
- [13] NIKANDER A, PERTTI J. Identification of high-impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1187-1194.
- [14] LIU Baowen, MA Hongzhong, XU Honghua, et al. Single phase to ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 139-147.
- [15] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009: 183-195.
- [16] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11.
- JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11.
- [17] 杨磊, 曾祥君, 喻锐, 等. 新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 57-62.
- YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 57-62.
- [18] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 45-49.
- LIN Xiangning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A novel method to identify single phase-to-earth fault in the neutral un-effective grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 45-49.
- [19] 陈维江, 蔡国雄, 蔡雅萍, 等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式探究[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 56-60.
- CHEN Weijiang, CAI Guoxiong, CAI Yaping, et al. Neutral grounding mode in 10 kV distribution network via peterson coil with parallel resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 56-60.

作者简介:



韦莉珊

韦莉珊(1995—),女,广西南宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 326770849@qq.com);

贾文超(1984—),男,河北保定人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: jiawenchao_snow@163.com);

焦彦军(1963—),男,河北安国人,教授,博士,研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 任思思)

Fault line selection scheme in small current grounding system based on admittance asymmetry principle

WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of fault line selection in small current grounding system, a fault line selection scheme based on admittance asymmetry parameter is proposed, which draws on the idea of active protection. The difference of admittance asymmetry parameters between faulty line and healthy line is found out by changing the neutral grounding mode after the fault by the medium resistance. The unsymmetrical parameters can be used to measure the degree of admittance asymmetry. Results of the theoretical analysis and PSCAD simulation show that the admittance asymmetry of healthy line is 0, while that of faulty line is not 0 and bigger than 1, the faulty line can be selected accurately through the difference between them. The proposed scheme has high sensitivity and doesn't need to set the action threshold. The admittance asymmetry parameter is not affected by the transition resistance theoretically.

Key words: small current grounding system; fault line selection; admittance asymmetry; medium resistance

表 A1 中性点不接地系统故障参数识别统计

TableA1 Statistics of fault parameters identification of neutral ungrounded system

过渡电阻 R_f/Ω	导纳不对称度参数							选线结果
	故障线理论值	健全线理论值	仿真值					
			L_1	L_2	L_3	L_4 （故障）	L_5	
0.001	3.425	0	0.0008	0.0009	0.0014	3.4250	0.0040	L_4
100			0.0006	0.0008	0.0012	3.4251	0.0047	L_4
1000			0.0007	0.0008	0.0013	3.4250	0.0046	L_4
5000			0.0008	0.0010	0.0013	3.4250	0.0045	L_4

表 A2 中性点经消弧线圈接地系统故障参数识别统计

TableA2 Statistics of fault parameters identification of resonant grounding system

脱谐度	过渡电阻	中电阻状态	导纳不对称参数							选线结果
			故障线	健全线	L_1	L_2	L_3	L_4 (故障)	L_5	
$v=0$ (全补偿)	0.001	投入前	0 (中电阻投入前)	0	0.042	0.015	0.052	0.074	0.084	-
		投入后			0.002	0.005	0.005	2.157	0.011	L_4
	100	投入前	2.157 (中电阻投入后)	0	0.001	0.001	0.001	0.011	0.003	-
		投入后			0.001	0.001	0.001	2.157	0.005	L_4
	1000	投入前	2.157 (中电阻投入后)	0	0.004	0.002	0.001	0.011	0.005	-
		投入后			0.012	0.010	0.000	2.158	0.009	L_4
	5000	投入前	2.157 (中电阻投入后)	0	0.001	0.001	0.001	0.011	0.005	-
		投入后			0.002	0.002	0.001	2.156	0.005	L_4
	0.001	投入前	0.343 (中电阻投入前)	0	0.002	0.005	0.008	0.335	0.048	-
		投入后			0.001	0.001	0.002	2.183	0.004	L_4
$v=-10\%$ (过补偿)	100	投入前	2.183 (中电阻投入后)	0	0.000	0.001	0.001	0.338	0.005	-
		投入后			0.000	0.001	0.001	2.183	0.005	L_4
	1000	投入前	2.183 (中电阻投入后)	0	0.000	0.001	0.001	0.339	0.005	-
		投入后			0.001	0.001	0.001	2.182	0.004	L_4
	5000	投入前	2.183 (中电阻投入后)	0	0.001	0.001	0.002	0.338	0.004	-
		投入后			0.005	0.008	0.001	2.183	0.005	L_4

表 A3 不对称系统故障参数识别统计

TableA3 Statistics of fault parameters identification of asymmetrical system

系统类型	中电阻状态	过渡电阻 R_f/Ω	导纳不对称度参数					选线结果
			L_1	L_2	L_3	L_4 (故障)	L_5	
中性点不接地系统	—	0.001	0.032	0.030	0.037	3.566	0.060	L_4
		5000	0.094	0.103	0.118	3.911	0.189	L_4
中性点经消弧线圈接地系统	全补偿	0.001	0.029	0.033	0.037	0.176	0.060	-
			0.030	0.033	0.037	2.233	0.060	L_4
	$v=0$	5000	0.034	0.037	0.042	0.196	0.068	-
			0.076	0.084	0.095	2.447	0.154	L_4
	过补偿	0.001	0.029	0.047	0.057	0.225	0.053	-
			0.030	0.033	0.037	2.236	0.060	L_4
	$v=-10\%$	5000	0.031	0.034	0.040	0.227	0.064	-
			0.075	0.082	0.094	2.449	0.151	L_4