

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190355

不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析

袁超¹, 薛永端², 梅睿¹, 管廷龙², 陈燕擎¹

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 依据零序电压幅值的绝缘监察是配电网接地故障识别的基本保障, 中性点接地方式以及消弧线圈调节方式将影响高阻接地时的灵敏性。分析了不同接地方式配电网的零序电压随故障点过渡电阻及系统对地电容电流的变化规律, 确定了不同接地方式配电网能够监察的最大过渡电阻(即绝缘监察的灵敏度)。结果表明, 不接地系统灵敏度一般在 2 000 Ω 以上。预调谐式消弧线圈系统的灵敏度在 2 500 Ω 以上。随调谐式消弧线圈系统的灵敏度较小, 一般在 230~2 000 Ω 之间。小电阻接地系统与投切了并联小电阻之后的消弧线圈接地系统的灵敏度最小, 仅有数十欧姆。仿真和现场数据验证了分析的正确性。

关键词: 绝缘监察; 消弧线圈接地系统; 小电阻接地系统; 不接地系统; 灵敏性分析

Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes

YUAN Chao¹, XUE Yongduan², MEI Rui¹, GUAN Tinglong², CHEN Yanqing¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Insulation monitoring based on zero-sequence voltage amplitude is the basic guarantee for grounding fault identification of distribution network. Neutral grounding method and the mode of arc-suppression coil adjustment will affect the sensitivity under high-resistance grounding fault. This paper analyzes the variation law of zero-sequence voltage with transition resistance and capacitance current of system under different grounding modes. The maximum transition resistance that can be monitored under different grounding modes is determined (i.e. the insulation monitoring sensitivity). The results show that the sensitivity of the ungrounded system is generally above 2 000 Ω . The sensitivity of arc-suppression coil grounded system with pre-adjustment mode is above 2 500 Ω . The sensitivity of the arc-suppression coil grounded system with instantaneous adjustment mode is low, which is generally between 230 Ω and 2 000 Ω . The small resistance grounding system and the arc-suppression coil grounded system, after the input of small resistor, have the lowest sensitivity, which are only tens of ohms. Simulation and field data verify the correctness of the analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184) and Science and Technology Project of Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd. (No. KJXM-0164) "Small Current High-resistance Grounding Fault Detection Technology based on Low-frequency Component".

Key words: insulation monitoring; arc-suppression coil grounded system; small-resistance grounding system; ungrounded system; sensitivity analysis

0 引言

我国中压配电网多采用不接地或经消弧线圈接地方式^[1-2], 其绝缘监察技术普遍采用电磁式电压互

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477184); 江苏方天电力技术有限公司科技项目资助(KJXM-0164)“基于低频分量的小电流高阻接地故障检测技术”

感器反映的零序电压幅值监察系统绝缘状况(即判断是否发生单相接地故障)。虽然近年来的接地故障检测技术取得了较快的进展, 涌现出一批以暂态法^[3-7]和中电阻法^[8-10]为代表的检测技术, 使单相接地时的故障线路选择及定位难题得到一定缓解^[11], 但在现场中, 利用绝缘监察技术对单相接地故障进行告警, 并配合人工拉路方法确定故障线路、人工巡线方法确定故障点仍然是故障检测最基本的方

法^[12-13]。在故障选线与定位出现误判时, 它将会是接地故障保护最可靠、最后的一道防线。

即使在小电阻接地系统中, 故障零序电流足够大^[14-16], 零序过电流保护对于低阻接地故障有足够的可靠性, 但多数变电站仍保留了绝缘监察功能, 以求尽量提高接地故障检测的可靠性。

通常绝缘监察装置的报警值设置为10~30 V(零序电压二次值), 当零序电压超过整定值时即导通信号节点, 在公用测控装置处发出线路接地故障警告。然而, 由于不同系统的中性点接地方式以及消弧线圈调节方式不同, 其各自的系统零序阻抗也不相同, 使得相同故障点过渡电阻时零序电压幅值相差甚远, 从而导致监察装置的灵敏性出现差异。即, 某系统能够监察到较高过渡电阻的接地故障; 而有些系统仅能监察到较低的过渡电阻。使得部分高阻接地故障因无法被及时发现而持续存在甚至进一步发展, 威胁人身安全以及产生不必要的经济损失^[17-21]。因此, 对于利用零序电压幅值的绝缘监察功能在不同接地系统中的灵敏性分析显得尤为必要。

本文分别针对不接地系统、消弧线圈接地系统、小电阻接地系统及消弧线圈并小电阻系统的故障等值电路, 分析了零序电压幅值随故障点过渡电阻及系统对地电容电流的变化规律, 确定了不同接地系统下的零序电压绝缘监察装置的灵敏性。最后利用数字仿真进行了验证。

1 接地故障零序电压计算

图1设定了一个包含 n 条出线的配电网, 其中, \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 与 \dot{E}_C 分别为三相电源电势; C_{i0} ($i=1,2,3,\dots,n$) 为线路 L_i 的零序对地电容(等于单相线路对地电容); $L_{p.g}$ 为消弧线圈电感; R_g 为中性点接地电阻; f 为单相接地故障的接地故障点, R_f 为故障点过渡电阻值; 不接地系统中开关 $K1$ 、 $K2$ 全部断开; 预调谐式的消弧线圈接地系统中 $K1$ 断开、 $K2$ 闭合; 随调谐式消弧线圈接地系统, 接地故障时在消弧线圈投入前 $K1$ 、 $K2$ 为断开状态, 投入后为 $K1$ 断开、 $K2$ 闭合状态; 小电阻接地系统中 $K1$ 闭合、 $K2$ 断开; 消弧线圈并小电阻系统, 在正常运行及接地故障初始阶段, $K1$ 、 $K2$ 的状态取决于消弧线圈调谐方式, 小电阻投入后 $K1$ 、 $K2$ 均为闭合状态。

根据接地故障点边界条件及序网结构图, 不同接地方式配电网的单相接地故障等值电路如图2所示。其中: u_f 为故障点虚拟电源, 其电压等于故障点故障前的反相电压; L 为故障点到母线间线路电感; $L_p=3L_{p.g}$ 为3倍的消弧线圈电感; $R_n=3R_g$ 为3倍的

系统中性点接地电阻; $R=3R_f$ 为3倍的故障点过渡电阻; $C = \sum_{i=1}^n C_{i0}$ 为系统零序电容; i_f 为故障点零序电流; u_0 为系统中性点电压, 即母线零序电压; Z_0 为母线处检测到的系统零序阻抗, 可近似等于系统中性点对地的零序等效阻抗, 取决于 $K1$ 、 $K2$ 的状态。

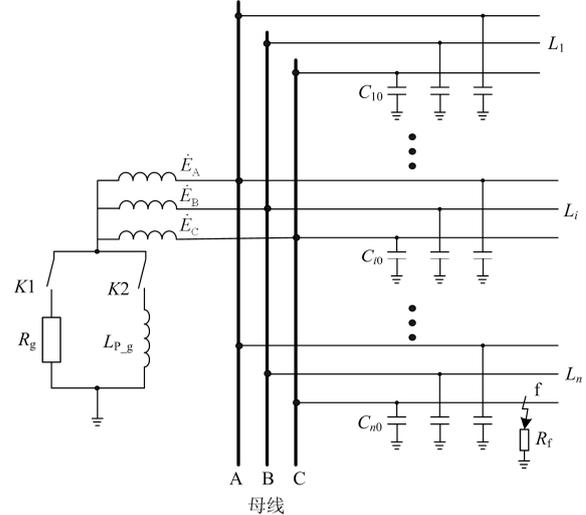


图1 不同接地方式下配电网结构图

Fig. 1 Distribution network structure diagram under different grounding modes

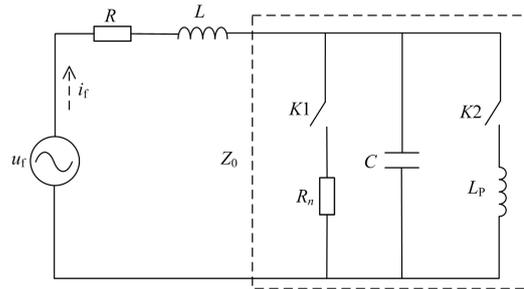


图2 不同接地系统接地故障等效电路

Fig. 2 Grounding fault equivalent circuit of different grounding systems

经过理论计算与仿真验证发现, 与故障点过渡电阻与线路电感相比, 线路阻尼率对绝缘监察灵敏度的影响较小, 可以忽略, 因此图2等值电路中未考虑线路的阻尼率因素, 于是零序电压 U_0 可表示为

$$U_0 = \left| \frac{Z_0}{R + Z_0 + j\omega L} \right| U_f \quad (1)$$

式中: ω 为工频角频率; U_f 为虚拟电压源有效值。

可见, 接地故障, 特别是高阻接地故障时, 零序电压主要取决于故障点过渡电阻与系统零序阻抗

的比值。即,在绝缘监察的零序电压门槛值一定的前提下,所能监察到的最大过渡电阻(即绝缘监察灵敏度)主要取决于系统的零序阻抗。而系统零序阻抗主要受到系统中性点接地方式以及消弧线圈或小电阻调节方式的影响。

另一方面,对于任何一个配电网,均可以利用相电压与金属性接地故障($R=0$)时的故障点电流来近似计算系统零序阻抗:

$$Z_0 = \frac{3\dot{U}_0}{\dot{I}_f} \approx \frac{3\dot{U}_f}{\dot{I}_f} = -\frac{3\dot{E}_X}{\dot{I}_f} \quad (2)$$

式中, \dot{E}_X 为故障相电源电势。即,无论系统中性点接地方式如何,金属性接地故障时故障点的残流越大,则系统零序阻抗越小。

2 不同接地方式配电网接地故障零序电压变化规律

绝缘监察装置的报警启动值范围一般为 10~30 V(二次值,如无特殊说明,以下电压值均为二次侧值),本文均设为常用的 15 V。

2.1 不接地系统

根据图2,不接地系统的系统零序阻抗为

$$Z_0 = -j\frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

对于10 kV系统,根据国家电网公司发布的《配电网技术导则》,不接地系统的对地电容电流应小于10 A^[22],但现场有些系统的电容电流达到20 A时仍然采用不接地方式,因此本文所讨论的不接地系统的电容电流范围为0~20 A。即,不接地系统中一般有 $Z_0 > 866 \Omega$ 。

根据式(1)和式(3),所能监察的最大过渡电阻值 R_{cr} 可表示为

$$R_{cr} = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\left(\frac{U_f}{U_{0_thr_m}}\right)^2 - 1} \approx \frac{1}{\omega C} \frac{U_f}{U_{0_thr_m}} \quad (4)$$

式中, $U_{0_thr_m}$ 为绝缘监察装置的零序电压启动门槛值。可见,绝缘监察的灵敏度会随着系统零序电容的增大而减小。

图3给出了母线零序电压(二次侧值)与故障点过渡电阻及系统对地电容电流之间的关系,其值会随着过渡电阻与系统对地电容电流的增大而减小,其中黄色平面为绝缘监察装置启动门槛值(二次15 V)。可见,在系统的电容电流较小时(<13 A),所能监察的过渡电阻可达3 000 Ω 以上,但在系统对地电容电流达到20 A时,所能监察的最大过渡电阻只有2 000 Ω 。

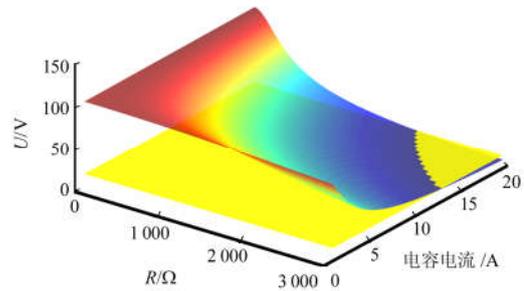


图3 不接地系统中零序电压与过渡电阻及系统对地电容电流的关系

Fig. 3 Relationship between zero-sequence voltage and transition resistance and system capacitance in ungrounded system

2.2 消弧线圈接地系统

消弧线圈接地系统的对地电容电流一般大于20 A。当消弧线圈分别为预调谐式和随调谐式^[23-26]时,由于系统零序阻抗差异较大,其绝缘监察的效果也完全不同。

(1) 预调谐式消弧线圈系统

根据图2,系统零序阻抗为

$$Z_0 = j\frac{\omega L_p}{1 - \omega^2 L_p C} = j\frac{1}{\omega C \nu} \quad (5)$$

式中, ν 与公式中一致为消弧线圈过补偿度,一般为5%~10%。多数系统电容电流会小于100 A,金属性接地时故障点电流小于10 A,对应的系统零序阻抗将大于1.73 k Ω 。当系统电容电流大于100 A且过补偿度较大时,则系统零序阻抗将可能小于1.73 k Ω 。

根据式(1)和式(5),所能监察的最大过渡电阻值 R_{cr} 可表示为

$$R_{cr} = \frac{1}{\omega C \nu} \sqrt{\left(\frac{U_f}{U_{0_thr_m}}\right)^2 - 1} \approx \frac{1}{\omega C \nu} \frac{U_f}{U_{0_thr_m}} \quad (6)$$

可见,绝缘监察灵敏度会随系统零序电容与过补偿度的增大而减小。

母线零序电压会随过渡电阻、系统对地电容电流以及消弧线圈过补偿度的增大而减小。为讨论较极端情况下的零序电压与启动门槛值的关系,设消弧线圈的过补偿度为一个较大值(10%),此时零序电压的整体取值偏小,图4给出了该情况下典型预调谐式消弧线圈系统在故障后的零序电压与故障点过渡电阻及系统对地电容电流之间的关系,可见,预调谐式消弧线圈系统可监察的最大过渡电阻在2 500 Ω 以上。

但如果消弧线圈的管理不到位,有可能使系统长期处于严重的欠补偿或过补偿状态,会使得系统

零序阻抗减小, 相同过渡电阻条件下零序电压随之降低, 将使绝缘监察的灵敏度下降。

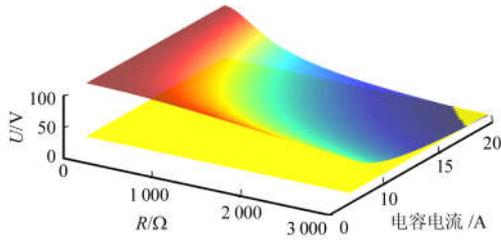


图4 预调谐式消弧线圈接地系统中零序电压与过渡电阻及系统对地电容电流的关系

Fig. 4 Relationship between zero-sequence voltage and transition resistance and system capacitance in arc-suppression coil grounded system with pre-adjustment mode

(2) 随调谐式消弧线圈系统

随调谐式消弧线圈在正常工作时远离谐振状态, 因此在接地故障后的初始阶段, 可认为无补偿作用。只有当零序电压高于预设的门槛值 $U_{0_thr_Lp}$ 时, 随调谐式消弧线圈才投入运行, 这与预调谐式消弧线圈始终处于补偿状态不同。

在接地故障发生后、消弧线圈尚未投入前, 系统零序阻抗与不接地系统相同, 可用式(3)表达, 由于系统对地电容电流一般大于 20 A, 此时有 $|Z_0| < 866 \Omega$ 。零序电压会随过渡电阻、系统对地电容电流的增大而减小, 其值(二次侧值)与故障点过渡电阻及系统对地电容电流之间的关系如图 5 所示。可见, 当系统的电容电流较小(20 A)时, 所能监察(或能成功投入消弧线圈)的故障过渡电阻达近 2 000 Ω , 而在系统电容电流为 150 A 时, 所能监察到(或能成功投入消弧线圈)的故障过渡电阻则只有 230 Ω 左右。

消弧线圈投入后, 系统零序阻抗可用式(5)表

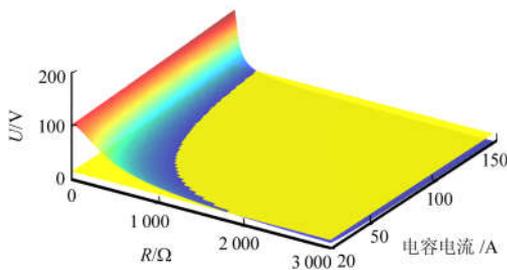


图5 随调谐式消弧线圈系统中零序电压与过渡电阻及系统对地电容电流的关系

Fig. 5 Relationship between zero-sequence voltage and transition resistance and system capacitance in arc-suppression coil grounded system with instantaneous adjustment mode

达, 可见, 在相同故障点过渡电阻条件下, 消弧线圈投入后系统零序阻抗将变为原来的 $1/\nu$ 倍(一般为 10~20 倍)。此时, 零序电压 U_0 可以表示为

$$U_0 = U_{0pr} \left| \frac{R + Z_0}{\nu R + Z_0} \right| \approx \frac{U_f}{\sqrt{\left(\frac{\nu U_f}{U_{0pr}} \right)^2 + 1}} \quad (7)$$

式中, U_{0pr} 为消弧线圈投入前的零序电压。其值主要与消弧线圈过补偿度有关, 会随后者的增大而减小, 考虑到消弧线圈投入的门槛值一般在 10~30 V, 过补偿度在 5%~10%, 则消弧线圈投入之后的零序电压范围在 70~100 V 之间。

现场中, 消弧线圈投入门槛值 $U_{0_thr_Lp}$ 与绝缘检测门槛值 $U_{0_thr_m}$ 一般并不相等。若 $U_{0_thr_Lp} < U_{0_thr_m}$, 则消弧线圈投入之后绝缘监察必定启动; 若 $U_{0_thr_m} \leq U_{0_thr_Lp}$, 在零序电压达到 $U_{0_thr_m}$ 后就会发出绝缘告警, 而无论消弧线圈是否能够投入。综上所述, 绝缘监察的灵敏度取决于 $U_{0_thr_Lp}$ 与 $U_{0_thr_m}$ 中的较低者。

此时, 绝缘监察所能监察的最大过渡电阻值可表示为

$$R_{cr} \approx \frac{1}{\omega C} \frac{U_f}{\min(U_{0_thr_m}, U_{0_thr_Lp})} \quad (8)$$

即, 其灵敏度也随着系统零序电容的增大而减小, 但与消弧线圈过补偿度无关。

2.3 小电阻接地系统

考虑到系统中性点接地电阻多为 10 Ω ^[27], 系统零序阻抗可表示为

$$Z_0 = \frac{R_n}{1 + \omega^2 C^2 R_n^2} - j \frac{\omega C R_n^2}{1 + \omega^2 C^2 R_n^2} \approx R_n \quad (9)$$

即可近似认为系统零序阻抗主要取决于系统中性点接地电阻, 而与系统零序电容无关, 此时可监察到的最大过渡电阻 R_{cr} 可表示为

$$R_{cr} = \left(\frac{U_f}{U_{0_thr_m}} - 1 \right) \times R_n \quad (10)$$

可见, 绝缘监察的灵敏度会随着系统中性点接地电阻的增大而增大。

典型小电阻接地系统在接地故障后的零序电压主要与故障点过渡电阻有关, 会随故障点过渡电阻的增大而减小。绘制零序电压与故障点过渡电阻及系统对地电容电流之间的关系如图6所示, 可见, 零序电压总体上偏小, 在故障过渡电阻较小(约 50 Ω) 时已小于启动门槛值, 无法实现接地故障的监察及

告警。

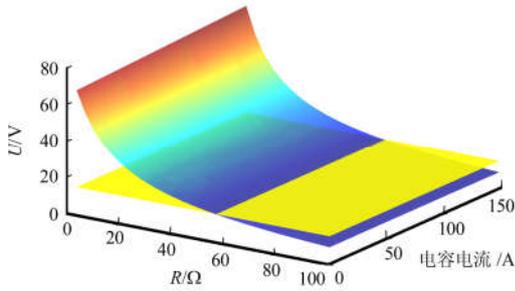


图 6 小电阻接地系统中零序电压与过渡电阻及系统对地电容电流的关系

Fig. 6 Relationship between zero-sequence voltage and transition resistance and system capacitance in small-resistance grounding system

2.4 消弧线圈并小电阻系统

该系统的对地电容电流一般大于20 A。小电阻投入前的系统零序阻抗与消弧线圈接地系统相同(根据消弧线圈调谐方式,分别如式(3)、式(5)所示),而投入后的系统零序阻抗可表示为

$$Z_0 = \frac{R_n}{1 + (\nu\omega CR_n)^2} - j \frac{\nu\omega CR_n^2}{1 + (\nu\omega CR_n)^2} \approx R_n \quad (11)$$

即可近似认为系统零序阻抗主要取决于系统中性点接地电阻。

根据消弧线圈的调谐方式,小电阻投入前的零序电压变化规律分别如图4、图5所示,零序电压及绝缘监察的灵敏度变化规律与相应消弧线圈接地系统相同。小电阻投入后,系统的零序阻抗将变得非常小,零序电压及绝缘监察灵敏度变化规律将与小电阻接地系统相同,在故障过渡电阻较小时(50 Ω左右)已无法正确监察到线路接地故障,告警将返回。

3 绝缘监察灵敏性分析

根据上节分析,在不同接地系统中,零序电压幅值均随接地点过渡电阻及系统对地电容电流的增大而减小,但各系统中零序阻抗不同,其绝缘监察的灵敏度也不同。

为比较不同接地系统下的线路绝缘监察动作情况,采用典型系统参数,取零序电压启动门槛值为15 V(二次侧),不同接地系统所能监察的最大过渡电阻 R_{cr} 随系统对地电容电流的变化趋势如图 7 所示。由式(6)可知,预调谐式消弧线圈系统中的过补偿度对监察灵敏度也有影响,图 7 中分别给出了过补偿度较大时(10%)与较小时(5%)的曲线以确定其影响范围。对于消弧线圈并小电阻系统,其在小电阻投入前的灵敏度与消弧线圈接地系统相同,小电

阻投入后的灵敏度与小电阻接地系统相同,未在图 7 中单独展示。

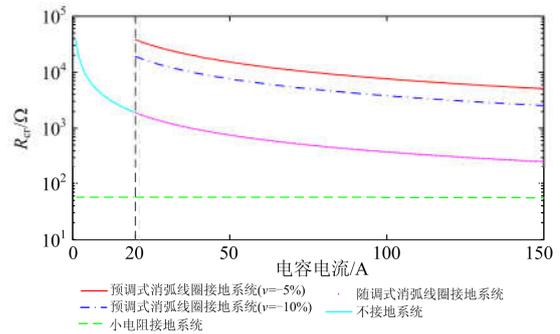


图 7 所能监察的最大过渡电阻随系统电容电流的变化趋势
Fig. 7 Change trend of the maximum transition resistance that can be monitored varies with system capacitance current

分析图 7 可以发现,小电阻接地系统监察灵敏度与系统电容电流无关,其他接地系统均随系统对地电容电流的增加而减小。预调谐式消弧线圈系统由于其系统零序阻抗较大,在消弧线圈过补偿度较大时监察灵敏度在 2 500 Ω 以上,在过补偿度减小后灵敏度更高,在 5 000 Ω 以上;随调谐式消弧线圈系统的电容电流在 20 A 与 150 A 之间变化时,监察灵敏度在 2 000 Ω 到 230 Ω 之间;不接地系统的监察灵敏度在 2 000 Ω 以上;小电阻接地系统的监察灵敏度随系统零序电容的变化基本稳定在 50 Ω 左右。

考虑到小电流接地故障选线的灵敏度一般小于 2 000 Ω,在预调谐式消弧线圈系统、不接地系统以及电容电流较小的随调谐式消弧线圈系统中,利用零序电压的绝缘监察灵敏度要高于接地故障选线的灵敏度,因此,可以作为接地故障的后备保护,即选线失败或者拒动时,可以利用绝缘监察发现系统存在接地故障,并进一步利用轮切^[2-3]等手段切除故障。对于电容电流较大的随调谐式消弧线圈系统,绝缘监察的灵敏度可能低于选线灵敏度。对于小电阻接地系统以及消弧线圈并小电阻系统,尽管常用的零序过电流保护灵敏度较低(定值 40 A 对应 140 Ω,定值 60 A 对应 90 Ω),但绝缘监察的灵敏度仍小于保护灵敏度,仅能在低阻接地且保护装置拒动时提供一定参考作用。

需要注意的是,对于消弧线圈并小电阻系统,当过渡电阻大于数十欧姆时,小电阻投入后,无论保护是否正确动作,绝缘监察均会返回,因此,不能依据绝缘监察返回来判断故障是否被切除。另外,本文中所讨论的不接地系统的电容电流均在 0 A 至 20 A 之间,但其在极端情况下可能会高于 20 A,此

时不接地系统绝缘监察的灵敏度与消弧线圈投入之前的随调谐式消弧线圈接地系统相同, 因此可以参考随调谐式消弧线圈接地系统的绝缘监察动作情况。

4 仿真验证

基于图 1 所示配电网, 利用 Matlab-Simulink 构造不同接地系统的仿真模型, 母线出线数量取为 5 条, 消弧线圈接地系统、小电阻接地系统以及消弧线圈并小电阻系统的系统电容电流为 73 A, 不接地系统的系统电容电流为 10 A, 消弧线圈接地系统中的消弧线圈过补偿度设为 8%, 中性点接地小电阻阻值取为 10Ω 。

经过大量仿真后发现所得到的规律与上文所述相同, 在此分别取其中比较典型的 400Ω 与 1000Ω 接地故障下的各接地系统零序电压二次侧波形如图 8 和图 9 所示。图中, 阶段一对应故障前; 对于不接地系统、小电阻接地系统, 阶段二、三、四对应故障后; 对于随调谐式消弧线圈并小电阻系统, 阶段二对应故障发生到消弧线圈投入之间, 阶段三对应消弧线圈投入后到并联小电阻投入之间, 阶段四对应并联小电阻投入之后; 对于预调谐式消弧线圈并小电阻系统, 阶段二、三对应故障发生后到并联小电阻投入之前, 阶段四对应并联小电阻投入之后。为方便观察, 各阶段的时长做了相应调整。因消弧线圈接地系统的零序电压波形与消弧线圈并小电阻系统投切小电阻之前的波形相同, 故未在图中展示。

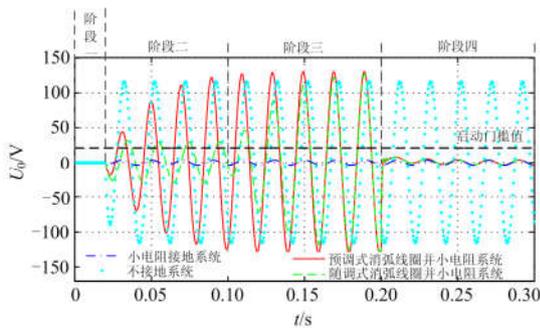


图 8 400Ω 故障过渡电阻下不同接地系统母线零序电压波形对比

Fig. 8 Comparison of zero-sequence voltage in different grounding modes under 400Ω fault grounding resistance

当故障过渡电阻比较低时, 绝缘监察装置的动作情况如下:

(1) 故障发生后, 不接地系统、消弧线圈接地系统与消弧线圈并小电阻系统的母线零序电压均高于启动门限值, 可以正确监察接地故障。

(2) 随调谐式消弧线圈系统与随调谐式消弧线

圈并小电阻系统投入中性点消弧线圈后, 母线电压幅值升高, 绝缘监察更可靠。

(3) 当消弧线圈并小电阻系统投入并联小电阻以后, 母线电压大幅降低, 无法正确监察接地故障, 此时告警将会消失。

(4) 故障发生后, 小电阻接地系统的母线零序电压幅值过低, 无法监察到线路上的接地故障。

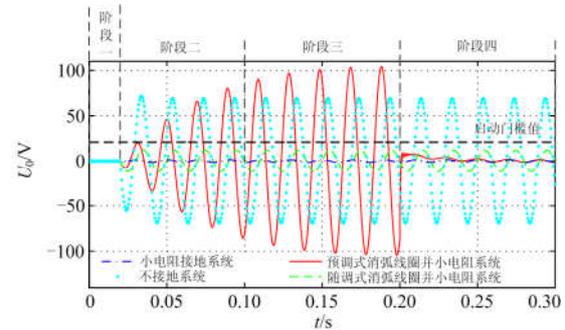


图 9 1000Ω 故障过渡电阻下不同接地系统母线零序电压波形对比

Fig. 9 Comparison of zero-sequence voltage in different grounding modes under 1000Ω fault grounding resistance

当故障过渡电阻比较高时, 绝缘监察装置的动作情况如下:

(1) 不接地系统、预调谐式消弧线圈系统与预调谐式消弧线圈并小电阻系统的母线零序电压均高于启动门限值, 可以正确监察接地故障并告警。

(2) 当预调谐式消弧线圈并小电阻系统投入并联小电阻以后, 母线电压大幅降低, 无法正确监察接地故障, 此时告警将会消失。

(3) 随调谐式消弧线圈系统与随调谐式消弧线圈并小电阻系统的母线电压幅值会低于启动门限值, 无法正确监察接地故障与告警。

(4) 小电阻接地系统的母线零序电压幅值过低, 无法监察到线路上的接地故障。

5 结论

不同接地系统中, 利用零序电压幅值的绝缘监察灵敏度主要取决于接地故障时的系统零序阻抗, 不接地系统在 2000Ω 以上; 预调谐式消弧线圈系统在消弧线圈过补偿度较大时也可达 2500Ω 以上, 在过补偿度减小后的监察灵敏度更高; 随调谐式消弧线圈系统一般在 230Ω 到 2000Ω 之间; 小电阻接地系统的监察灵敏度只有 50Ω 左右。消弧线圈并小电阻系统, 在投入并联小电阻之后, 绝缘监察可能返回, 无法继续实现对线路接地故障的监察与告警。除小电阻接地系统外, 其他接地系统的绝缘监察灵敏

度均会随系统对地电容电流的增加呈减小趋势。

在预调谐式消弧线圈系统、不接地系统以及电容电流较小的随调谐式消弧线圈系统中，绝缘监察灵敏度要高于接地故障选线的灵敏度，可以作为接地故障的后备保护。其他情况下则无法实现上述作用。

参考文献

[1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115, 198.
ZHANG Linli, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115, 198.

[3] BI Yanqiu, ZHAO Jianguo, ZHANG Dahai. Single-phase-to-ground fault feeder detection based on transient current and wavelet packet[C] // 2004 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004, November 21-24, 2004, Singapore, Singapore: 936-940.

[4] JI Peng, PEI Yujie, ZHAO Shihui, et al. A novel location method for single-phase grounding fault for distribution network based on transient technique[C] // 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), June 9-11, 2018, Shenyang, China: 5190-5193.

[5] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 120-125.
ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 120-125.

[6] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 64-68.
YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A fault feeder selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.

[7] COSTA F B, SOUZA B A, BRITO N S D, et al. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6):

5312-5323.

[8] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.
MA Shicong, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.

[9] TONG N, LIN X, ZHANG R, et al. Fault identification method based on the neutral point medium resistance switching-on for the distribution network[C] // 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), December 7-10, 2014, Hong Kong, China: 1-5.

[10] 陆国庆, 张瑞红, 刘味果, 等. 小扰动法与并联电阻法选线方式的比较分析[J]. 电力设备, 2007(8): 24-27.
LU Guoqing, ZHANG Ruihong, LIU Weiguo, et al. Comparison and analysis on line selection node of small disturbance method and shunt resistance method[J]. Electrical Equipment, 2007(8): 24-27.

[11] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

[12] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 48-52.
MA Shicong, XU Bingyin, GAO Houlei, et al. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents[J]. Power System Protection and Control, 2008, 32(7): 48-52.

[13] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.

[14] 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]. Power System Protection and Control, 2016, 40(16): 112-117.

[15] 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, 29.
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, 29.
- [16] 李海锋, 陈嘉权, 曾德辉, 等. 小电阻接地系统高灵敏性零序电流保护[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(9): 198-204.
LI Haifeng, CHEN Jiaquan, ZENG Dehui, et al. High sensitive zero-sequence current protection for low-resistance grounding system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(9): 198-204.
- [17] HAGHIFAM M R, SEDIGHI A R, MALIK O P. Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(3): 359-367.
- [18] KIM C H, KIM H, KO Y H, et al. A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, 17(4): 921-929.
- [19] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
- [20] GHADERI A, MOHAMMADPOUR H A, GINN H L, et al. High-Impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(3): 1260-1268.
- [21] MACEDO J R, RESENDE J W, BISSOCHI C A, et al. Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(16): 2593-2601.
- [22] 国家电网有限公司. 配电网技术导则: Q/GDW10370—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [23] 要焕年, 曹梅月. 谐振接地技术新发展[J]. *中国电力*, 2000, 33(10): 55-57.
YAO Huannian, CAO Meiyue. New development of resonance neutral earthing technology[J]. *Electric Power*, 2000, 33(10): 55-57.
- [24] 孙成勋, 桑振华, 杨晓瑛, 等. 基于定相增量法的消弧线圈新型调谐方法[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(10): 105-108.
SUN Chengxun, SANG Zhenhua, YANG Xiaoying, et al. A new tuning method of the arc-suppression coil based on the phasing increments[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(10): 105-108.
- [25] 朱少林, 谢聿琳, 叶力行. 调谐方式对消弧线圈并联运行的影响[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2006, 18(1): 82-85.
ZHU Shaolin, XIE Yulin, YE Lixing. Effect of automatic tuning mode principle on parallel operation of arc-suppression coil[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2006, 18(1): 82-85.
- [26] 连鸿波, 谭伟璞, 裴善鹏, 等. 谐振接地电网预随调补偿方式及其实现[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(21): 83-88.
LIAN Hongbo, TAN Weipu, PEI Shanpeng, et al. Principle and realization of presetting and following-setting compensation mode in resonant grounded system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(21): 83-88.
- [27] 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]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 46(22): 15-21.

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-09-03

作者简介:

袁超(1987—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: kobeyuanchao@163.com

薛永端(1970—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网接地方式与接地故障自愈技术、配电网自动化技术。E-mail: xueyd70@126.com

(编辑 周金梅)