考虑系统不对称的小电流接地故障相识别

张林利¹,张 毅²,薛永端³,王 超⁴,邵志敏¹
(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003;
2. 国网山东省电力公司潍坊供电公司,山东 潍坊 261041;
3. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院 电气工程系,山东 青岛 266580;
4. 山东科汇电力自动化股份有限公司,山东 济南 250101)

摘要:针对存在不对称情况的不接地系统与谐振接地系统,分析了接地故障前、后三相电压幅值的变化规律, 提出可适应系统不对称的接地相识别方法:故障后若只有一相电压幅值相较于故障前降低,则此相为故障 相;若有两相电压幅值降低,则中性点不接地系统中电压幅值升高相的滞后相为故障相,谐振接地系统过补 偿状态下电压幅值升高相的超前相为故障相。所提方法简单实用,只需接地故障前、后三相电压幅值信息即 可准确识别不对称状态下的接地故障相,且不受电压互感器测量误差的影响,在过渡电阻较大时也可准确识 别故障相。数字仿真验证了理论分析和所提方法的正确性。

关键词:小电流接地系统;单相接地;系统不对称;故障选相中图分类号:TM 77 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.004

0 引言

我国中压配电系统多采用小电流接地方式,主要包括中性点不接地和中性点经消弧线圈接地(谐振接地)2种形式^[1-4]。对于小电流接地系统单相接地故障,近年来的研究与应用热点在于故障位置检测(选线、分段、测距以及分界等),而对于接地故障相识别(故障选相)的关注较少。故障相的准确识别可以为故障检测以及故障巡线与修复提供有益信息。特别地,接地故障选相已成为新兴消弧技术(如转移消弧^[5]、有源柔性补偿^[6])的基础,一旦选相失败,不仅影响接地故障消弧效果,还可能引发两相接地短路故障,扩大事故性质与范围。鉴于上述原因,供电部门已经开始重视接地故障选相问题,如山东电网组织的相关装置测试中,已将接地故障选相列入考核指标。

小电流接地故障的传统选相判据仅利用了故障 后的三相电压幅值信息^[7-9],即:谐振接地系统过补 偿时,电压幅值最高相的超前相为故障相;欠补偿或 中性点不接地时,电压幅值最高相的滞后相为故障 相。传统判据简单实用,但仅在忽略系统不对称的 情况下成立,当系统对地参数不对称并引发较大的 不对称零序电压时,传统判据可能会失效^[9-10]。架 空线路换位欠佳^[11],部分单芯电缆线路的三相参 数、长度不相等^[12],以及配电网有时采用非全相供 电方式^[13]等因素,均会造成系统三相对地参数不平

收稿日期:2018-04-24;修回日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477184);国网山 东省电力公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477184) and the Science & Technology Program of State Grid Shandong Electric Power Company 衡。架空线系统的不对称度一般为1.5%~2%,理论极限可达3.5%,电缆系统的不对称度小于架空线系统的不对称度「1」。对于采用小电流接地方式的配电网,系统不对称会造成中性点电压偏移,即不对称电压^[14],中性点不接地系统的不对称电压一般较小,而谐振接地系统中消弧线圈与系统对地电容的谐振作用会增加不对称电压^[14-16],给故障识别、处理造成干扰。因此,克服不对称电压的影响已成为接地故障选相技术亟待解决的问题。

目前,已有部分文献研究了系统不对称情况下 的故障相识别问题:文献[9]分析了消弧线圈不同 补偿状态下随着过渡电阻变化的零序电压轨迹,在 精确测量电网不对称度、阻尼率和消弧线圈脱谐度 等参数[17]的条件下,通过构造新的"相"矢量辨识 接地相:文献[10]详细分析了故障后的零序电压 轨迹,根据零序电压变化的特征将坐标系分为若干 扇区,利用不同扇区的零序电压随过渡电导变化的 特征实现故障选相。上述2种方法的主要问题是, 其需要测量系统不对称度等参数,不利于在配电网 中进行实用。文献[18]提出利用小波变换的时频 特性提取故障后各相 a 模电流的行波能量.根据不 同故障类型中各相电流行波能量的相对关系确定 相应的选相方法和判据,该方法针对中性点直接接 地的输电网络,对于配电网的适用性有待进一步 研究。

本文根据中性点不接地和谐振接地的配电系统 等值电路,推导出接地故障前、后三相电压幅值的表 达式,并分析幅值的变化规律,以此提出简单实用的 考虑系统不对称的小电流接地故障相识别判据,最 后利用仿真验证了所提判据的正确性。

1 接地故障前、后三相电压幅值计算

1.1 中性点不接地系统三相电压幅值计算

图 1 为中性点不接地系统简化图。图中 E_A 、 E_B 、 E_C 为三相电源电势; U_A 、 U_B 、 U_C 为母线三相对 地电压; U_0 为中性点电压; I_A 、 I_B 、 I_C 为出线三相电 流; C_A 、 C_B 、 C_C 为系统三相对地电容;系统 A 相发生 单相接地故障, g_d 为故障点过渡电导, g_A 、 g_B 、 g_C 为 系统三相的对地泄漏电导,由于实际运行中三相的 对地泄漏电导极小,且一般近似相等,在计算中可认 为 $g_A = g_B = g_C = g_0$ 。



图1 中性点不接地系统简化图

Fig.1 Simplified diagram of isolated neutral system

中性点不接地系统发生单相接地故障前,在中 性点处由基尔霍夫电流定律^[19]可得:

 $U_{A}(g_{0}+j\omega C_{A})+U_{B}(g_{0}+j\omega C_{B})+U_{C}(g_{0}+j\omega C_{C})=0$ (1) 其中,ω为角频率。

母线三相电压
$$U_A \ U_B \ U_C$$
 可表示为:

$$\begin{cases}
U_A = E_A + U_0 \\
U_B = E_B + U_0 \\
U_C = E_C + U_0
\end{cases}$$
(2)

令:

$$\begin{cases} G+jY=(C_{\rm A}+\alpha^2 C_{\rm B}+\alpha C_{\rm C})/(C_{\rm A}+C_{\rm B}+C_{\rm C})\\ d_0=3g_0/[\omega(C_{\rm A}+C_{\rm B}+C_{\rm C})] \end{cases}$$
(3)

其中,G+jY为系统不对称度的相量表达式,实部 G和虚部 Y的值与系统三相对地电容的大小有关; α 为对称分量法变换系数^[18]; d_0 为中性点不接地系统的阻尼率。由式(1)—(3)可得,发生接地故障前母线三相电压幅值表达式为:

$$\begin{cases} | \boldsymbol{U}_{A} | = U_{ph} \frac{\sqrt{(1-G)^{2} + (d_{0}+Y)^{2}}}{\sqrt{1+d_{0}^{2}}} \\ | \boldsymbol{U}_{B} | = U_{ph} \frac{\sqrt{\left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3} d_{0}}{2} - G\right)^{2} + \left(\frac{d_{0}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} - Y\right)^{2}}}{\sqrt{1+d_{0}^{2}}} \quad (4) \\ | \boldsymbol{U}_{C} | = U_{ph} \frac{\sqrt{\left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3} d_{0}}{2} - G\right)^{2} + \left(\frac{d_{0}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} - Y\right)^{2}}}{\sqrt{1+d_{0}^{2}}} \end{cases}$$

其中, U_{ph} 为系统单相电源电压幅值,其值等于 E_A 、 E_B 、 E_C 的电压幅值。同理可得,发生接地故障后母 线三相电压幅值表达式为:

$$\begin{cases} | \mathbf{U}_{A}' | = U_{ph} \frac{\sqrt{(1-G)^{2} + (d_{0}+Y)^{2}}}{\sqrt{1+(d_{0}+d')^{2}}} \\ | \mathbf{U}_{B}' | = \\ \sqrt{\left[-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}(d_{0}+d')}{2} - G\right]^{2} + \left(\frac{d_{0}+3d'}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} - Y\right)^{2}}}{\sqrt{1+(d_{0}+d')^{2}}} \\ | \mathbf{U}_{C}' | = \\ \sqrt{\left[-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}(d_{0}+d')}{2} - G\right]^{2} + \left(\frac{d_{0}+3d'}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} - Y\right)^{2}}}{\sqrt{1+(d_{0}+d')^{2}}} \end{cases}$$

$$(5)$$

$$d' = \frac{g_{\rm d}}{\omega(C_{\rm A} + C_{\rm B} + C_{\rm C})} \tag{6}$$

其中,*d*′为故障后由过渡电导产生的系统阻尼率。 1.2 **谐振接地系统三相电压幅值计算**

图 2 为谐振接地系统简化图,图中 *L* 为消弧线 圈的电感,*g_L* 为消弧线圈的并联电导。



图 2 谐振接地系统简化图

Fig.2 Simplified diagram of resonant grounding system 同理推导可得,谐振接地系统单相接地故障前 三相电压幅值表达式为:

$$\begin{cases} | \boldsymbol{U}_{A} | = U_{ph} \frac{\sqrt{(v-G)^{2} + (d_{1}+Y)^{2}}}{\sqrt{v^{2}+d_{1}^{2}}} \\ | \boldsymbol{U}_{B} | = U_{ph} \frac{\sqrt{\left(-\frac{1}{2}v - \frac{\sqrt{3}d_{1}}{2} - G\right)^{2} + \left(\frac{d_{1}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}v - Y\right)^{2}}}{\sqrt{v^{2}+d_{1}^{2}}} \\ | \boldsymbol{U}_{C} | = U_{ph} \frac{\sqrt{\left(-\frac{1}{2}v + \frac{\sqrt{3}d_{1}}{2} - G\right)^{2} + \left(\frac{d_{1}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}v - Y\right)^{2}}}{\sqrt{v^{2}+d_{1}^{2}}} \\ \begin{cases} d_{1} = \frac{3g_{0} + g_{L}}{\omega(C_{A} + C_{B} + C_{C})} \\ v = \frac{\omega(C_{A} + C_{B} + C_{C}) - 1/(\omega L)}{\omega(C_{A} + C_{B} + C_{C})} \end{cases}$$
(8)

其中,*d*₁为谐振接地系统的阻尼率;*v*为消弧线圈的 失谐度。

同理可得,发生接地故障后母线三相电压幅值 表达式为:

$$\begin{cases} | \boldsymbol{U}_{A}' | = U_{ph} \frac{\sqrt{(v-G)^{2} + (d_{1}+Y)^{2}}}{\sqrt{v^{2} + (d_{1}+d')^{2}}} \\ | \boldsymbol{U}_{B}' | = \\ \sqrt{\left[-\frac{v}{2} - \frac{\sqrt{3}(d_{1}+d')}{2} - G \right]^{2} + \left(\frac{d_{1}+3d'}{2} - \frac{\sqrt{3}v}{2} - Y \right)^{2}}}{\sqrt{v^{2} + (d_{1}+d')^{2}}} \\ | \boldsymbol{U}_{C}' | = \\ \sqrt{\left[-\frac{v}{2} + \frac{\sqrt{3}(d_{1}+d')}{2} - G \right]^{2} + \left(\frac{d_{1}+3d'}{2} + \frac{\sqrt{3}v}{2} - Y \right)^{2}}}{\sqrt{v^{2} + (d_{1}+d')^{2}}} \end{cases}$$

$$(9)$$

2 接地故障相识别判据

2.1 中性点不接地系统故障相识别判据

由式(4)、(5)得,中性点不接地系统故障前、后 A 相电压幅值平方比为:

$$\left(\frac{|U'_{\rm A}|}{|U_{\rm A}|}\right)^2 = \frac{1+d_0^2}{1+(d_0+d')^2} < 1$$
(10)

显然,故障发生后故障相电压幅值相较于故障 前下降,在发生低阻接地故障时下降幅度更为明显, 在发生高阻接地故障时仅略微下降。以对地电容电 流为 20 A 的 10 kV 不接地系统为例,设阻尼率 d_0 = 2%,则过渡电阻分别为 50 Ω_1 000 Ω 时,故障相电 压分别为故障前的 2.89%、95.57%。在相同过渡电 阻条件下,系统对地电容电流越小,则故障相电压幅 值下降越明显。

故障前、后 B 相电压幅值平方比为:

$$\left(\frac{|U_{\rm B}'|}{|U_{\rm B}|}\right)^{2} = \frac{1+d_{0}^{2}}{1+(d_{0}+d')^{2}} \times \frac{\left[-\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{3}(d_{0}+d')}{2}-G\right]^{2}+\left(\frac{d_{0}+3d'}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}-Y\right)^{2}}{\left(-\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{3}d_{0}}{2}-G\right)^{2}+\left(\frac{d_{0}}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}-Y\right)^{2}}$$
(11)

将式(11)中的分子、分母分别用 *M*₁ 和 *M*₂ 表示,则有:

$$M_{1}-M_{2} = \left[3(d')^{2}+3d_{0}d'-\sqrt{3}d'+\sqrt{3}d'G-3d'Y\right](1+d_{0}^{2}) - (1+d_{0}^{2}+G^{2}+G+\sqrt{3}d_{0}G+Y^{2}-d_{0}Y+\sqrt{3}Y) \times \left[(d')^{2}+2d_{0}d'\right]$$
(12)

系统不对称度的理论极限为 3.5%, 所以 G 和 Y 的取值小于 3.5%。发生单相接地故障后由过渡电阻导致系统增加的阻尼率 d' 随过渡电阻的增大而减小。因此,式(12)可近似为:

$$M_1 - M_2 = 2(d')^2 - \sqrt{3}d' \tag{13}$$

显然,当故障点过渡电阻较低时,故障后 B 相电 压幅值升高;当过渡电阻较高时,故障后 B 相电压幅 值下降。以对地电容电流为 20 A 的 10 kV 不接地 系统为例,由式(13)可知,故障前、后 B 相电压幅值 保持不变的过渡电阻临界值约为 333 Ω,即当故障 点过渡电阻小于 333 Ω 时,故障后 B 相电压幅值降 低,而过渡电阻高于 333 Ω 时电压幅值升高。

故障前、后 C 相电压幅值平方比为:

$$\frac{\left|\left|U_{c}^{'}\right|\right|^{2}}{\left|\left|U_{c}\right|\right|^{2}} = \frac{1+d_{0}^{2}}{1+\left(d_{0}+d'\right)^{2}} \times \frac{\left[-\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}\left(d_{0}+d'\right)}{2}-G\right]^{2}+\left(\frac{d_{0}+3d'}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}-Y\right)^{2}}{\left(-\frac{1}{2}+\frac{\sqrt{3}d_{0}}{2}-G\right)^{2}+\left(\frac{d_{0}}{2}+\frac{\sqrt{3}}{2}-Y\right)^{2}}$$

$$(14)$$

将式(14)中的分子、分母分别用 N₁ 和 N₂ 表示,则有:

$$N_{1}-N_{2} = [3(d')^{2}+3d_{0}d'+\sqrt{3}d'-\sqrt{3}d'G-3d'Y](1+d_{0}^{2}) - (1+d_{0}^{2}+G^{2}+G-\sqrt{3}d_{0}G+Y^{2}-d_{0}Y-\sqrt{3}Y) \times [(d')^{2}+2d_{0}d']$$
(15)
式(15)可近似为:

$$N_1 - N_2 = 2(d')^2 + \sqrt{3}d' > 0 \tag{16}$$

显然,无论过渡电阻是多少,故障后 C 相电压幅 值均升高。进一步分析可知,随着过渡电阻的增大, 故障后电压与故障前电压之比先增大后减小。

综上所述,考虑系统不对称的中性点不接地系统接地故障相识别判据为:故障后若只有一相电压幅值相较于故障前降低,则此相为故障相;故障后若有两相电压幅值降低,则电压幅值升高相的滞后相为故障相。

2.2 谐振接地系统故障相识别判据

由式(8)、(9)可得谐振接地系统故障前、后 A 相电压幅值平方比为:

$$\left(\frac{|U'_{\rm A}|}{|U_{\rm A}|}\right)^2 = \frac{v^2 + d_1^2}{v^2 + (d_1 + d')^2} < 1$$
(17)

显然故障相电压幅值降低,在发生低阻接地故障时下降更明显,在发生高阻接地故障时下降重度减小。以对地电容电流为100 A 的10 kV 谐振接地系统为例,设系统阻尼率 $d_1 = 5\%$ 、消弧线圈失谐度 v = -10%,则过渡电阻分别为50 Ω 、1 000 Ω 时,故障

后 A 相电压幅值分别为故障前的 3.10%、57.85%。 故障前、后 B 相电压幅值平方比为:

$$\left(\frac{|U_{\rm B}'|}{|U_{\rm B}|}\right)^{2} = \frac{v^{2} + d_{1}^{2}}{v^{2} + (d_{1} + d')^{2}} \times \frac{\left[-\frac{1}{2}v - \frac{\sqrt{3}(d_{1} + d')}{2} - G\right]^{2} + \left(\frac{d_{1} + 3d'}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}v - Y\right)^{2}}{\left(-\frac{1}{2}v - \frac{\sqrt{3}d_{1}}{2} - G\right)^{2} + \left(\frac{d_{1}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}v - Y\right)^{2}}$$
(18)

将式(18)中的分子、分母分别用 P_1 和 P_2 表示,则有:

$$P_{1}-P_{2} = [3(d')^{2}+3d_{1}d'-\sqrt{3}vd'+\sqrt{3}d'G-3d'Y](v^{2}+d_{1}^{2}) - (v^{2}+d_{1}^{2}+G^{2}+vG+\sqrt{3}d_{1}G+Y^{2}-d_{1}Y+\sqrt{3}vY) \times [(d')^{2}+2d_{1}d']$$
(19)

设系统不对称度值
$$\rho = \sqrt{G^2 + Y^2}$$
,则有:

$$\begin{cases} |G + \sqrt{3}Y| \leq 2\rho \\ |\sqrt{3}G + Y| \leq 2\rho \end{cases}$$
(20)

为防止消弧线圈与系统对地电容发生谐振,消 弧线圈通常工作在过补偿状态,v一般取值为-10%~ -8%。系统阻尼率 d₁包括了线路对地电导和消弧 线圈电导的阻尼率,通常在5%以上。即满足:

$$\begin{cases} |v| > 2\rho \\ d_1 > \rho \end{cases}$$
(21)

由式(19)—(21)可得,*P*₁-*P*₂>0,因此谐振接地 系统过补偿状态下,发生单相接地故障后 B 相电压 幅值升高。

故障前、后 C 相电压幅值平方比为:

$$\left(\frac{|\mathbf{U}_{c}'|}{|\mathbf{U}_{c}|}\right)^{2} = \frac{v^{2} + d_{1}^{2}}{v^{2} + (d_{1} + d')^{2}} \times \frac{\left[-\frac{1}{2}v + \frac{\sqrt{3}(d_{1} + d')}{2} - G\right]^{2} + \left(\frac{d_{1} + 3d'}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}v - Y\right)^{2}}{\left(-\frac{1}{2}v + \frac{\sqrt{3}d_{1}}{2} - G\right)^{2} + \left(\frac{d_{1}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}v - Y\right)^{2}}$$
(22)

将式(22)中的分子、分母分别用 Q₁ 和 Q₂ 表示,则有:

$$Q_{1}-Q_{2} = [3(d')^{2}+3d_{1}d'+\sqrt{3}vd'-\sqrt{3}d'G-3d'Y](v^{2}+d_{1}^{2}) - (v^{2}+d_{1}^{2}+G^{2}+vG-\sqrt{3}d'G+Y^{2}-d_{1}Y-\sqrt{3}vY) \times [(d')^{2}+2d_{1}d']$$
(23)

由式(23)及前述分析可得,当故障过渡电阻较低时,故障后 C 相电压幅值升高,当故障过渡电阻较高时,C 相电压幅值可能升高。具体变化情况与系统不对称度相关。

综上所述,考虑系统不对称的谐振接地系统接 地故障相识别判据为:故障后若只有一相电压幅值 相较于故障前降低时,则此相为故障相;故障后若有 两相电压幅值降低时,则电压幅值升高相的超前相 为故障相。

3 仿真验证

3.1 仿真模型

搭建小电流接地系统故障仿真模型如附录中的 图 A1 所示。设系统 A 相发生单相接地故障, g_d 为 故障点过渡电导。电缆参数如下:零序电阻 $R_0 = 2.7$ Ω /km,零序电感 $L_0 = 0.25$ mH/km,对地零序电容 $C_0 = 279.9$ nF/km。架空线参数为:零序电阻 $R_0 = 2.3$ Ω /km,零序电感 $L_0 = 5.478$ mH/km,对地零序电容 $C_0 = 8$ nF/km。变压器为 Y/ Δ 形接法,高、低压侧变 比为 110 kV/10 kV。消弧线圈并联电导。负荷模型采 用三角形等效接法,参数为 400 Ω 。 Q_1 — Q_7 为各出 线断路器,K 为消弧线圈接入开关,Q开关 Q_1 和 Q_7 闭合时,仿真中性点不接地系统;当所有开关均闭合 时,仿真谐振接地系统。

3.2 中性点不接地系统接地故障相识别判据验证

在 G = -2.58%、Y = -2.68%的情况下,图 3 给出 了三相电压幅值在接地故障前、后的变化量随过渡 电阻的变化关系。



Fig.3 Three-phase voltage amplitude varying along with change of transition resistance before and after fault

由图 3 可知:故障后故障相 A 相电压幅值相较 于故障前降低,且随着故障过渡电阻的增大,降低的 幅度减小;故障相滞后相 B 相的电压幅值随过渡电 阻的增大先升高后降低;故障相超前相 C 相的电压 幅值始终升高,且随着故障过渡电阻的增大,升高的 幅度先增大后减小。通过不同不对称度情况下的多 次仿真表明,中性点不接地系统三相电压幅值在接 地故障前、后的变化关系不受系统不对称的影响,仿 真曲线的变化趋势与图 3 一致,验证了分析及所提 接地相识别判据的正确性。

3.3 谐振接地系统故障相识别判据验证

图 4 为谐振接地系统故障前、后三相电压幅值 变化量随过渡电阻的变化关系,图中,*C*₁、*C*₂、*C*₃分 别为 *C*=2.66%、*Y*=0.66%情况下的 A、B、C 相电压 幅值相较于故障前的变化量; C_4 、 C_5 、 C_6 分别为G=-1.90%、Y=-1.97%情况下的A、B、C相电压幅值变 化量; C_7 、 C_8 、 C_9 分别为G=-0.76%、Y=2.63%情况 下的A、B、C相电压幅值相较于故障前的变化量。



图 4 谐振接地系统故障前、后三相电压幅值变化量 随过渡电阻的变化关系

Fig.4 Three-phase voltage amplitude varying along with change of transition resistance in resonance grounding system before and after fault

由图 4 可知,不同不对称度下,谐振接地系统三 相电压幅值变化量随过渡电阻的变化曲线存在较大 差异。故障后故障相 A 相电压幅值降低,且随着故 障过渡电阻的增大,降低的幅度不断减小。故障相 滞后相的 B 相电压幅值始终升高。故障相超前相 C 相的电压幅值均为先增大后降低。图 4 验证了所提 谐振接地系统接地相识别判据的正确性。

附录中的表 A1 给出了不同条件下的 A 相发生 高阻接地(接地电阻为1500Ω)故障时三相电压变 化情况及传统方法、本文方法的选相结果。从表中 可以看出,不同消弧线圈补偿度、不同不对称度的系 统发生高阻接地故障时,本文方法均可准确识别故 障相;而现场使用最多的传统判据,即:谐振接地系 统过补偿时,电压幅值最高相的超前相为故障相,欠 补偿或中性点不接地时,电压幅值最高相的滞后相 为故障相,则存在3次识别错误。

图 5 为表 A1 中的最后一行的情况下,在 0.06 s 发生单相接地故障时三相电压幅值图。由传统判据 得故障后 C 相电压幅值最大,则误判其超前相 B 相 为故障相,选相失败。利用本文所提判据可得 B 相 电压幅值升高,A、C 相电压幅值降低,电压幅值升高 相的超前相 A 相为故障相,选相正确。



Fig.5 Three-phase voltage amplitude in resonant grounding system

4 结语

本文理论推导出考虑系统不对称的小电流接地

系统发生单相接地故障前、后三相电压表达式,并分 析得出故障前、后三相电压幅值的变化规律。据此 提出考虑系统不对称的单相接地故障相识别判据 为:中性点不接地系统中,故障后若只有一相电压幅 值相较于故障前降低,则此相为故障相;若两相电压 幅值降低,则电压幅值升高相的滞后相为故障相。 谐振接地过补偿系统中,故障后若只有一相电压幅 值相较于故障前降低,则此相为故障相;若两相电压 幅值降低,则电压幅值升高相的超前相为故障相。

与现场常用的仅利用故障后电压幅值大小关系的传统选相方法相比,本文方法可适用于系统存在不对称的情况。与利用中性点电压轨迹的选相方法相比,本文方法仅需要比较故障前、后三相电压幅值变化信息,不需要已知系统参数,且算法简单,能有效避免电压互感器测量误差所带来的影响,便于装置应用。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

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,2004:34-47.
- [2] 王崇林. 中性点接地方式与消弧线圈[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999;9-38.
- [3] 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.
- [4]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 disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10): 189-196.
- [5] 徐玉琴,陈志业,李鹏. 晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应 用研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(13):38-41. XU Yuqin,CHEN Zhiye,LI Peng. Design and application research on arc suppression coil with thyristor series capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(13):38-41.
- [6]张毅,薛永端,宋华茂,等. 低阻接地故障有源电压消弧算法性能分析和改进[J]. 电网技术,2017,41(1):314-321.
 ZHANG Yi,XUE Yongduan,SONG Huamao, et al. Performance analysis and improvement of active voltage arc-suppression algorithm about low resistance grounding fault [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(1):314-321.
- [7] XU Yao, ZENG Xiangjun, LIU Zhanglei, et al. Novel control techniques of petersen-coil[C] // IEEE International Conference on Industrial Technology. Chengdu, China: IEEE, 2008:1-4.
- [8] 秦光培. 单相接地时电网各电压变化规律及其应用[J]. 昆明 理工大学学报,1998,23(5):11-16. QIN Guangpei. Each voltage variable law and it's application of the network when single phase-ground[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology,1998,23(5):11-16.
- [9] 徐波,张建文,蔡旭,等. 电网不对称条件下小电流接地系统接 地相辨识[J]. 电工技术学报,2011,26(12):175-182.

29

XU Bo,ZHANG Jianwen,CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12);175-182.

- [10] 刘宝稳,王崇林,李晓波.不对称电网不完全接地故障零序电压 轨迹及应用[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4959-4967.
 LIU Baowen, WANG Chonglin, LI Xiaobo. Analysis and application of zero-sequence voltage of single-phase ground fault asymmetrical system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(28):4959-4967.
- [11] 杨耿杰. 电力系统不对称计算[M]. 北京:中国电力出版社, 2008:22-27.
- [12] 刘玉友,姚金霞,任万彬,等. 35 kV 海底电缆电压异常原因分析及对策[J].山东电力技术,2008(2);56-58.
 LIU Yuyou, YAO Jinxia, REN Wanbin, et al. Analysis and countermeasure on abnormal voltage in 35 kV submarine cable[J]. Shandong Dianli Jishu,2008(2):56-58.
- [13] 汤放奇,李景禄,曾祥君,等. 补偿电网中性点电压异常的原因及对策[J]. 高电压技术,2005,31(4):12-13.
 TANG Fangqi, LI Jinglu, ZENG Xiangjun, et al. Analysis of abnormal displacement voltage of neutral points in compensated electric

network and its control measure [J]. High Voltage Engineering, 2005,31(4):12-13.

- [14] 谢菁,薛永端,徐丙垠. 小电流接地系统不对称电压有源补偿控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):115-121.
 XIE Jing, XUE Yongduan, XU Bingyin. An active compensation and control method of asymmetrical voltage in non-solidly grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 115-121.
- [15]何锡祺,齐郑,杨以涵,等.并联电抗器组合式消弧线圈的研究[J].电力系统自动化,2008,32(3):92-96.

HE Xiqi,QI Zheng,YANG Yihan, et al. Research on combined arc suppression coil with shunt reactor [J]. Automation of Electric

Power Systems, 2008, 32(3):92-96.

- [16] 束洪春,徐亮,彭仕欣,等. 谐振接地电网故障选线相关分析法
 [J]. 电力自动化设备,2008,28(9):6-9.
 SHU Hongchun, XU Liang, PENG Shixin, et al. Correlation analysis for faulty feeder detection in resonant earthed system[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(9):6-9.
- [17] 曾祥君,易文韬,刘张磊,等. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):77-80.
 ZENG Xiangjun, YI Wentao,LIU Zhanglei, et al. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(4):77-80.
- [18] 麦瑞坤,何正友,符玲,等. 基于电流行波能量和小波变换的输电线路故障选相研究[J]. 电网技术,2007,31(3):38-43.
 MAI Ruikun, HE Zhengyou, FU Ling, et al. Study on faulty phase selection based on energy of current traveling wave and wavelet transform[J]. Power System Technology,2007,31(3):38-43.
- [19] 陈怡,蒋平,万秋兰,等. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2005:7-9.

作者简介:



张林利(1979—),男,山东滨州人,高级工程师,博士,研究方向为配电网技术 (E-mail;zhang_linli@163.com);

张 毅(1990—),男,山东潍坊人,硕 士,研究方向为配电网故障检测(E-mail: zhangyi_31415926@163.com);

薛永端(1970-),男,山西运城人,教

授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为配电网故 障检测(E-mail:xueyd70@126.com)。

Fault phase identification of non-solidly grounding system considering system asymmetry

ZHANG Linli¹, ZHANG Yi², XUE Yongduan³, WANG Chao⁴, SHAO Zhimin¹

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Weifang Power Supply Company, Weifang 261041, China;

3. Department of Electrical Engineering, College of Information and Control Engineering,

China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

4. Shandong Kehui Electric Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Aiming at ungrounding system and resonant grounded system with asymmetry, the magnitude variation rule of three-phase voltage before and after fault is analyzed. A grounding phase identification method suitable for asymmetric system is proposed. If there is only one phase whose voltage magnitude decreases after grounding fault compared with that before fault, this phase can be judged as fault phase. If two phase voltage magnitudes decrease, there are two possibilities: for neutral ungrounding system the lag phase of the phases whose voltage magnitude increase will be the fault phase; for the resonant grounded system, the lead phase of the phases whose voltage magnitude increase will be the fault phase. The proposed method is simple and practical, which can accurately identify the fault phase under asymmetrical state only by using the magnitude information of three-phase voltage before and after fault phase when the transition resistance is large. The accuracy of the theoretical analysis and proposed method is verified by simulation.

Key words: non-solidly grounding system; single-phase grounding fault; system asymmetry; fault phase identification



图 A1 小电流接地系统故障仿真模型 Fig.A1 Fault Simulation model of non-solidly grounded system

表 A1 不同情况下 A 相高阻接地故障相识别判据仿真结果 Table A1 Simulative results of fault phase identification criterion of phase-A high resistance grounded fault under different conditions

v/%	G/%	Y/%	三相电压幅值/V						选相结果	
			U _A	U ' _A	U B	U ' _B	U c	U 'c	传统判据	本文判据
-8	2.66	0.66	9218	8500	8529	10011	6902	6405	A	A
-8	-1.90	-1.97	6902	6372	9218	10364	8529	8311	A	A
-8	-0.76	2.63	8529	7870	6902	8317	9218	8341	В	A
-9	2.66	0.66	9177	8541	8480	9894	6976	6439	A	A
-9	-1.90	-1.97	6976	6500	9177	10274	8480	8223	А	A
-9	-0.76	2.63	8480	7898	6976	8301	9177	8324	В	A
-10	2.66	0.66	9139	8571	8439	9781	7044	6481	A	A
-10	-1.90	-1.97	7044	6613	9139	10184	8439	8151	A	A
-10	-0.76	2.63	8439	7920	7044	8282	9139	8315	В	A

附录