

基于瞬时零序功率的谐振接地系统单相接地选线新方法

李 斌, 束洪春

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对谐振接地系统单相接地故障, 基于瞬时功率理论, 提出了采用瞬时零序功率的复合选线新方法。分析了系统故障后的稳态及暂态故障特征。利用坐标变换后的故障信号分别推导、计算了稳态和暂态过程线路上的瞬时零序功率。通过对瞬时零序功率的分解得出, 故障前后线路上的零序功率振荡分量以及故障线路与非故障线路零序功率振荡分量成分不同、频率特征不同。通过提取并综合分析振荡分量中单倍、2 倍、4 倍以及 6 倍工频振荡信号来甄别故障线路。该方法综合暂态和稳态特征、考虑谐波信号、多判据互补、不涉及相位分析, 并且物理意义清晰。仿真及实录数据验证表明该方法有效。

关键词: 瞬时零序功率; 频率特性; 谐振接地系统; 单相接地故障; 故障选线

中图分类号: TM 713; TM 714.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.012

0 引言

谐振接地电网发生单相接地故障后, 接地点的电容电流得到消弧线圈感性电流的补偿, 使得故障点残余电流很小, 有利于接地电弧熄灭。同时因接地电流小、故障边界复杂、影响故障特征的因素多, 如补偿电网脱谐度、线路的结构参数、互感器的非线性及饱和现象、电弧的不稳定性以及负载的不平衡等, 信号的检测和选线判断困难^[1-2]。

利用故障暂态信号来构造瞬时功率或暂态能量的检测方法灵敏度高、方法灵活且不受消弧线圈影响, 如基于小波包的最小瞬时零序功率的选线方法^[3]。该方法需要选择合适的小波包, 但没有考虑不平衡电流的影响, 特别对于缆线混合配电网线路接地以及母线接地故障时, 将影响到其选线准确率。有学者提出利用瞬时功率的直流分量以及零序变化量的选线方法^[4]以及基于暂态能量的选线方法^[5-6], 由于涉及到相位的计算和方向的判别, 检测的可靠性不高。事实上, 谐振接地系统单相接地故障时, 故障线路零序电流得到消弧线圈感性电流的补偿作用, 可能出现倒相, 即在某一时刻故障零序电流突然反向^[7], 这将使得基于瞬时功率和暂态能量方向判别的方法失效; 另外, 利用传统能量大小的判别法, 并没有考虑不同谐波电压和谐波电流的乘积关系, 没有解释存在的振荡性的能量流的特性。基于瞬时功率理论, 对谐振接地系统发生单相接地故障进行分析, 可以发现更多的在传统频域功率理论中看不到的

故障细节特征^[8-11]。本文从瞬时零序功率入手, 通过分析、甄别故障时各线路瞬时零序功率振荡分量的频率特性, 从而检出故障线路。

1 选线原理

1.1 基本原理

经研究, 谐振接地系统发生单相接地故障时, 流过故障点的暂态接地电流由暂态的电容电流和暂态的电感电流组成, 由于两者的频率和幅值显著不同, 在暂态过程中不能互相补偿。而且发生故障时零序电压和零序电流常包含高频谐波分量, 加之负荷不对称等因素, 都会造成电流畸变, 使得故障信号表现为非正弦特征。非正弦条件下瞬时功率理论较传统功率理论更能准确地解释和描述系统中能量的传递过程^[12-14]。

瞬时功率理论^[15-18]是将三相系统作为一个单元来考虑。设线路相电压为 u_a, u_b, u_c , 线电流为 i_a, i_b, i_c , 进行 Clarke 变换, 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中得瞬时电压和电流分别为:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$
$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

在此基础上定义瞬时零序功率为:

$$p_0 = u_0 i_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (2)$$

收稿日期: 2012-07-03; 修回日期: 2013-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977039); 云南省自然科学基金重点资助项目(2005F0005Z)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977039) and the Key Program of Yunnan Province Natural Science Foundation of China(2005F0005Z)

其中, p_0 为瞬时零序功率, $\bar{p}_0$ 为平均分量, $\tilde{p}_0$ 为振荡分量。

瞬时零序功率不同于传统的有功功率和无功功率, 它可以分解为一个平均分量和一个振荡分量。平均分量表示一个单向的能量流, 代表单位时间内从电源传递到负载的能量, 它与传统的有功功率具有相同的特征; 振荡分量也瞬时传递能量, 代表单位时间内电源与负载间交换的能量, 由于是振荡性的, 其均值为零。

谐振接地系统发生单相接地故障时, 式(2)中的 u_0, i_0 实际为瞬时零序电压和瞬时零序电流。

为不失一般性, 取线路相电压和线电流分别为:

$$\begin{aligned} u_k(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{kn} \sin(\omega_n t + \varphi_{kn}) \\ i_k(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{kn} \sin(\omega_n t + \theta_{kn}) \end{aligned} \quad k=a, b, c \quad (3)$$

其中, n 为谐波次数, $\varphi_{kn}, \theta_{kn}$ 分别为电压和电流相位。

采用对称分量处理, 在时域中重写表达式并由式(1)得:

$$\begin{aligned} u_{\alpha}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} U_{(+n)} \sin(\omega_n t + \varphi_{(+n)}) + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} U_{(-n)} \sin(\omega_n t + \varphi_{(-n)}) \\ u_{\beta}(t) &= -\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} U_{(+n)} \sin(\omega_n t + \varphi_{(+n)}) + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} U_{(-n)} \sin(\omega_n t + \varphi_{(-n)}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_0(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6} U_{(0)n} \sin(\omega_n t + \varphi_{(0)n}) \\ i_{\alpha}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{(+n)} \sin(\omega_n t + \theta_{(+n)}) + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{(-n)} \sin(\omega_n t + \theta_{(-n)}) \\ i_{\beta}(t) &= -\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{(+n)} \sin(\omega_n t + \theta_{(+n)}) + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{(-n)} \sin(\omega_n t + \theta_{(-n)}) \\ i_0(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6} I_{(0)n} \sin(\omega_n t + \theta_{(0)n}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 下标(0)、(+)、(-)分别表示零序、正序、负序分量。

将式(4)和式(5)代入式(2)可得线路上的瞬时零序功率为:

$$\begin{aligned} p_0 &= \sum_{n=1}^{\infty} 3U_{(0)n} I_{(0)n} \cos(\varphi_{(0)n} - \theta_{(0)n}) + \\ &\quad \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} 3U_{(0)m} I_{(0)n} \cos[(\omega_m - \omega_n)t + \varphi_{(0)m} - \theta_{(0)n}] \right\} + \\ &\quad \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ -\sum_{n=1}^{\infty} 3U_{(0)m} I_{(0)n} \cos[(\omega_m + \omega_n)t + \varphi_{(0)m} + \theta_{(0)n}] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

瞬时零序功率是在时域中进行讨论的, 它对电压和电流的波形没有限制, 因此既可用于稳态分析, 也可用于暂态分析。

1.2 稳态分析

谐振接地系统发生单相接地故障时系统电流的分布如图1所示。

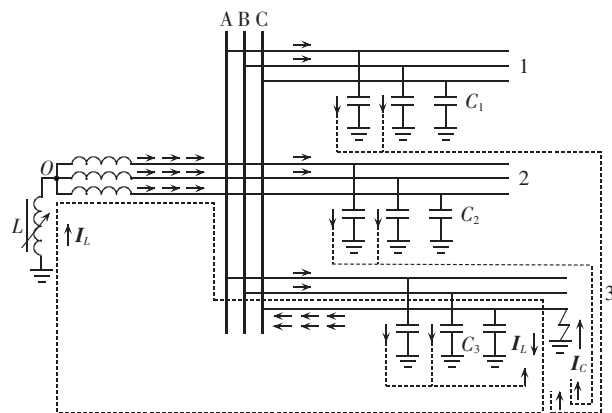


图1 谐振接地系统单相接地电流分布

Fig.1 Distribution of single-phase grounding current in resonant earthed system

就健全线路而言, 流过线路的零序电流只由本身的接地电容所决定。对于非故障线路1, 考虑基波信号, 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中有:

$$\begin{cases} u_{01} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U' \cos\left(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{3}\right) \\ i_{01} = \sqrt{6} U_0 \omega C_1 \cos\left(\omega t + \varphi_{u0} + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

其中, U' 为故障后相电压, φ_u 为电压初相角, C_1 为线路1的接地电容, U_0 为零序电压, φ_{u0} 为零序电压相位。

计算出线路1的瞬时零序功率为:

$$\begin{aligned} p_{01} &= u_{01} i_{01} = U' U_0 \omega C_1 \left[\cos\left(\varphi_u - \varphi_{u0} - \frac{1}{6}\pi\right) + \right. \\ &\quad \left. \cos\left(2\omega t + \varphi_u + \varphi_{u0} + \frac{5}{6}\pi\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

上式中第1项为平均分量, 第2项为振荡分量。

对于故障线路3而言, 故障点的接地电流由原来的电容电流变为补偿后的残流, 具有零序性质。健全相对地电容电流不变, 仍由各相对地电容决定。这样故障线路上的零序电流为:

$$3I_{(0)3} = j3\omega C_3 U_0 + \frac{U_0}{R} + j\omega C_{\Sigma} U_0 + \frac{U_0}{j\omega L} \quad (8)$$

其中, R 为谐振系统等值全损耗电阻, 由三相对地泄漏电阻和消弧线圈损耗电阻组成; L 为消弧线圈调谐电感; C_{Σ} 为电网三相对地电容; C_3 为线路3对地电容。

式(8)在时域中经过坐标变换, 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中为:

$$\begin{aligned}
i_{03} = & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_0 \frac{1}{R} \cos(\omega t + \varphi_{u0}) + \\
& \sqrt{6} \omega C_3 U_0 \cos\left(\omega t + \varphi_{u0} + \frac{\pi}{2}\right) + \\
& \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \omega C_{\Sigma} U_0 \cos\left(\omega t + \varphi_{u0} + \frac{\pi}{2}\right) + \\
& \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{1}{\omega L} U_0 \cos\left(\omega t + \varphi_{u0} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)
\end{aligned}$$

又由于 $u_{03} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U' \cos\left(\omega t + \varphi_u + \frac{\pi}{3}\right)$, 故可推算出故障线路 3 上的瞬时零序功率为:

$$\begin{aligned}
p_{03} = & \frac{1}{3} U' U_0 \frac{1}{R} \cos\left(\varphi_u - \varphi_{u0} + \frac{\pi}{3}\right) + \\
& U' U_0 \omega C_3 \cos\left(\varphi_u - \varphi_{u0} - \frac{\pi}{6}\right) + \\
& \frac{1}{3} U' U_0 \omega C_{\Sigma} \cos\left(\varphi_u - \varphi_{u0} - \frac{\pi}{6}\right) + \\
& \frac{1}{3} U' U_0 \frac{1}{\omega L} \cos\left(\varphi_u - \varphi_{u0} - \frac{5\pi}{6}\right) + \\
& \frac{1}{3} U' U_0 \frac{1}{R} \cos\left(2\omega t + \varphi_u + \varphi_{u0} + \frac{\pi}{3}\right) + \\
& U' U_0 \omega C_3 \cos\left(2\omega t + \varphi_u + \varphi_{u0} + \frac{5\pi}{6}\right) + \\
& \frac{1}{3} U' U_0 \frac{1}{\omega L} \cos\left(2\omega t + \varphi_u + \varphi_{u0} - \frac{\pi}{6}\right) + \\
& \frac{1}{3} U' U_0 \omega C_{\Sigma} \cos\left(2\omega t + \varphi_u + \varphi_{u0} + \frac{5\pi}{6}\right) \quad (10)
\end{aligned}$$

上式中等号右侧前 4 项为瞬时零序功率的平均分量,后 4 项为振荡分量。

比较式(7)和式(10)可知,健全线路和故障线路瞬时零序功率的振荡分量频率均为 2 倍工频,但区别很明显。健全线路瞬时零序功率振荡分量是一个单一的振荡信号,而故障线路瞬时零序功率的振荡分量是由多个相同频率、不同相位、不同幅值的信号叠加而成。一般情况下,故障线路中瞬时零序功率振荡分量远大于健全线路瞬时零序功率振荡分量。因此取线路瞬时零序功率 2 倍工频振荡分量最大者为故障线路。

系统发生单相接地故障时,高次谐波电流随之产生。其中以 5 次谐波分量为主,而且 5 次谐波电压较中性点电压小得多^[19-20]。因此,分析基波电压和 5 次谐波的作用具有普适性。

考虑健全线路 1,由 5 次谐波产生的瞬时零序功率振荡分量,由式(6)可得:

$$\begin{aligned}
\tilde{p}_{015} = & 3U_{(0)} I_{(0)15} \cos(4\omega t + \varphi_{(0)} - \theta_{(0)15}) - \\
& 3U_{(0)} I_{(0)15} \cos(6\omega t + \varphi_{(0)} + \theta_{(0)15}) \quad (11)
\end{aligned}$$

其中, $\tilde{p}_{015}$ 为线路 1 含 5 次谐波零序功率振荡分量,

$I_{(0)15}$ 和 $\theta_{(0)15}$ 分别为线路 1 的 5 次谐波零序电流及其相位。

同理,对于故障线路 3,有:

$$\begin{aligned}
\tilde{p}_{035} = & 3U_{(0)} I_{(0)35} \cos(4\omega t + \varphi_{(0)} - \theta_{(0)35}) - \\
& 3U_{(0)} I_{(0)35} \cos(6\omega t + \varphi_{(0)} + \theta_{(0)35}) \quad (12)
\end{aligned}$$

其中, $\tilde{p}_{035}$ 为故障线路 3 含 5 次谐波零序功率振荡分量, $I_{(0)35}$ 和 $\theta_{(0)35}$ 分别为故障线路 3 的 5 次谐波零序电流及其相位。

分析式(11)和式(12)可知,无论是健全线路还是故障线路,在瞬时零序功率的振荡分量中均出现了 4 倍和 6 倍基频的振荡信号。

研究表明,谐波电流的分布与基波电容电流相同,而且谐波电流中的容性分量与谐波次数成正比。健全线路中的 5 次谐波按本身电容电流分布,而故障线路中的 5 次谐波电流等于所有线路的 5 次谐波电流之和。因此,发生接地故障时,瞬时零序功率中 4 倍或 6 倍工频振荡信号大者为故障线路。对于 50 Hz 工频,仅考察瞬时零序功率中 200 Hz 和 300 Hz 这 2 个频段信号。

系统发生接地故障时,零序信号中既有基波分量又含各次谐波信号,只要从各线路瞬时零序功率振荡分量的频率入手,在基波和谐波共存的情况下可检出故障线路。

从物理意义上可作如下解释:发生单相接地可视为负荷发生了变化,意味着从电源到负载间传递的能量发生了变化;瞬时零序功率的振荡分量对能量的传递是有贡献的,对于故障线路而言,线路上传递能量的变化量应大于单一的健全线路。

1.3 暂态分析

线路发生电阻性接地故障时,流过故障点的暂态电流可用等值电路图 2 来分析。

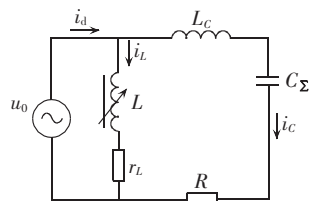


图 2 单相接地等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit of single-phase grounding

图中, C_{Σ} 为系统三相对地电容, L_c 为三相线路和变压器的等值电感, R 为过渡电阻, L 和 r_L 分别为消弧线圈的电感和电阻。

发生故障瞬间,流过故障点的暂态接地电流由暂态电容电流和暂态电感电流构成,根据图 2 电路列写微分方程可以求得接地电流 i_d 为:

$$\begin{aligned}
i_d = & i_c + i_L = k_{c1} \cos(\omega t + \theta_{c1}) + k_{c2} e^{-t/\tau_c} \cos(\omega_c t + \theta_{c2}) - \\
& k_{L1} e^{-t/\tau_L} - k_{L2} \cos(\omega t + \theta_{L1}) \quad (13)
\end{aligned}$$

其中, $\tau_L = \frac{L}{r_L}$, $\tau_C = \frac{2L_C}{R}$, $\omega_C = \sqrt{\frac{4L_C}{C} - R^2} / (2L_C)$, 相应各系数 k_{C1} 、 k_{C2} 、 k_{L1} 、 k_{L2} 和相位 θ_{C1} 、 θ_{C2} 、 θ_{L1} 由等值电路参数及零序电压和相位决定。

由式(13)可见, 故障线路接地电流包含 2 个同频率的稳态工频分量 $k_{C1}\cos(\omega t + \theta_{C1}) - k_{L2}\cos(\omega t + \theta_{L1})$ 、1 个衰减自由振荡分量 $k_{C2}e^{-t/\tau_C}\cos(\omega_C t + \theta_{C2})$ 和 1 个衰减直流分量 $k_{L1}e^{-t/\tau_L}$ 。

由于故障点的接地电流具有零序性质, 其对应的瞬时零序功率为:

$$\begin{aligned} p_{03}' = & K_1 \cos(\varphi_{(0)} - \theta_{C1}) - K_4 \cos(\varphi_{(0)} - \theta_{L1}) + \\ & K_1 \cos(2\omega t + \varphi_{(0)} + \theta_{C1}) - K_4 \cos(2\omega t + \varphi_{(0)} + \theta_{L1}) + \\ & K_2 e^{-t/\tau_C} \cos\left[(\omega + \omega_C)t + \varphi_{(0)} + \theta_{C2} + \frac{\pi}{3}\right] + \\ & K_2 e^{-t/\tau_C} \cos[(\omega - \omega_C)t + \varphi_{(0)} - \theta_{C2}] - \\ & K_3 e^{-t/\tau_L} \cos(\omega t + \varphi_{(0)}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为计算所得系数。

上式中右侧前 2 项为平均分量, 后 5 项为振荡分量。在振荡分量中有 2 倍工频的振荡信号、2 个自由衰减的振荡信号以及衰减的工频分量。由于自由振荡频率变化范围一般为 300~3000 Hz, 所以对应的信号为自由衰减的高频振荡信号, 而且衰减很快。

这里特别关注的是最后一项, 即衰减较慢的工频分量: $K_3 e^{-t/\tau_L} \cos(\omega t + \varphi_{(0)})$ 。这是由消弧线圈产生的暂态直流分量而形成的瞬时零序功率分量。健全线路中没有该感性的暂态直流分量, 或该分量很小, 在瞬时零序功率中就没有或仅存在很弱的衰减的工频振荡信号。

因此, 计算各线路瞬时零序功率并检出工频振荡信号, 此值较大者为故障线路。

2 选线算法

考虑到中压配网的多样性和故障状态的复杂性, 本文采用基于瞬时零序功率的复合算法。

采集各线路的瞬时零序电流和瞬时零序电压, 计算瞬时零序功率, 得到各线路瞬时零序功率波形。做陷波器, 分别检出单倍工频、2 倍、4 倍或 6 倍工频信号。考虑到系统负荷不平衡和导线换位欠佳引起的零序功率而影响选线的准确性, 在算法中设定一可变阈值。由于架空线路不对称度的理论极限值为 3.5%, 通常为 0.5%~1.5%, 较小的数值对应于电缆居多的混合电网, 另外电容电流随自然环境变化可达 10%。保护装置应躲过可能存在的的天不平衡现象, 可将阈值的范围设为 1~3 kW 之间。根据实测及仿真计算结果, 发生接地故障时的平均暂态过电压不超过 3.0 p.u.^[21]。故算法中, 如果各线路单倍工频瞬时零序功率最大值小于阈值 x , 并且故障后与故障前的比

值小于 5 则视为母线故障; 否则, 分别选出瞬时零序功率中单倍工频、2 倍工频、4 倍(或 6 倍)工频前 3 个最大值, 如果满足其中一项大于另外两项之和, 初步选出故障线路; 不满足重新比较; 进行首次判断后再进入表决, 最终获得多数票的线路为故障线路。算法实现流程见图 3。

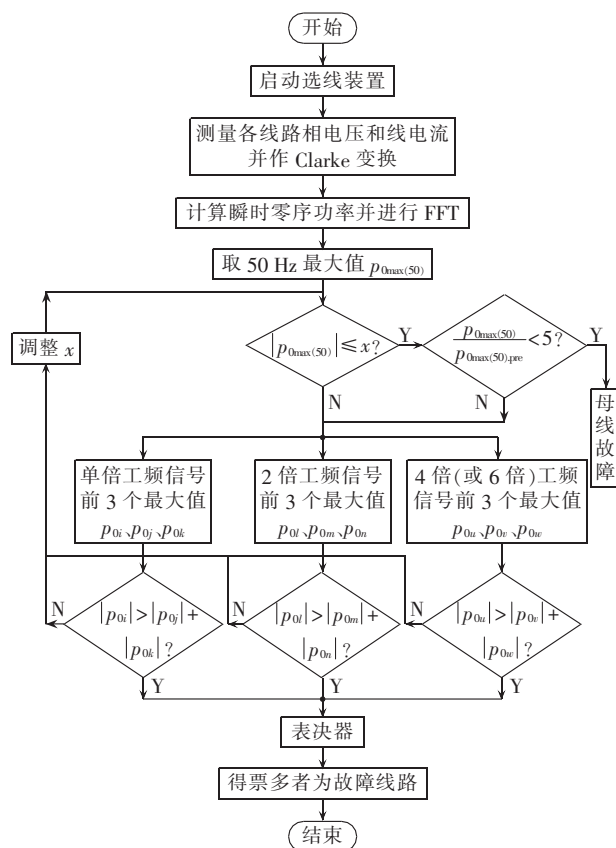


图 3 故障选线算法流程图

Fig.3 Flowchart of faulty line detection algorithm

该选线方法基于瞬时零序功率, 以振荡分量的不同频率成分为考核目标, 考虑了基波信号、谐波作用、不平衡电流以及暂态电流, 融合多判据。

3 仿真实验

MATLAB 仿真模型如图 4 所示。该系统为缆线混合, 有 7 条馈线, 其中 3 条架空线, 3 条电缆线, 1 条先线后缆。架空线参数: $R_1 = 0.175 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 1.212 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.01 \mu\text{F}/\text{km}$, $R_0 = 0.284 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 4.236 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 0.006 \mu\text{F}/\text{km}$ 。电缆参数: $R_1 = 0.075 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.254 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 0.318 \mu\text{F}/\text{km}$, $R_0 = 0.102 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 0.892 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 0.212 \mu\text{F}/\text{km}$ 。负荷统一为 $Z_L = 400 + j20 \Omega/\text{km}$ 。系统采用 Z 型变压器接消弧线圈接地。故障发生时刻为 0.02 s, 仿真时间 0.08 s, 采样频率 10 kHz。

首先, 设置故障发生在第 7 回线的 5 km 处, 故障角 30°, 过渡电阻 200 Ω , 系统含 5 次谐波。健全线

路(选馈线 l_2)瞬时零序功率的波形和频谱如图 5 和图 6 所示。故障线路 l_7 的瞬时零序功率波形和频谱如图 7 和图 8 所示。

比较图 6 和图 8 不难看出,故障线路上的瞬时

零序功率存在 50 Hz 工频信号,健全线路却没有;而且故障线路上瞬时零序功率 4 倍和 6 倍工频振荡信号均比健全线路大得多。

不同馈线、不同故障位置、不同过渡电阻、不同故障合闸角并含谐波的情况下,基于单倍工频信号的故障初选结果如表 1 所示。表中, θ 为故障角, R 为过渡电阻, X 为故障点距母线距离。

表 1 系统单相接地故障初选结果

Tab.1 Result of primary faulty line selection										
故障 线路	故障 状态	频率/ Hz	瞬时零序功率工频信号/kW							初选 结果
			l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	
l_1	$\theta=10^\circ$,	50	80	0	0	0	0	0	0	正确
	$R=1\ \Omega$,	100	44	1.24	0.72	13.6	6.9	3.8	6	正确
	$X=3\text{ km}$	300	25	0.06	0.05	0.96	0.49	0.28	0.4	正确
	$\theta=40^\circ$,	50	8.2	0	0	0.04	0.02	0.01	0.02	正确
	$R=100\ \Omega$,	100	9.6	1.3	0.75	14.5	7.5	4.1	6.4	错误
	$X=3\text{ km}$	300	5.1	0.11	0.06	1.2	0.6	0.35	0.5	正确
l_3	$\theta=25^\circ$,	50	0	0	6.7	0	0.1	0.1	0	正确
	$R=150\ \Omega$,	100	1.9	1.25	6.7	14	7.3	3.9	6.2	错误
	$X=4\text{ km}$	300	0.47	0.31	7.1	3.5	1.8	1.0	1.5	正确
	$\theta=50^\circ$,	50	0.1	0	7	0.5	0.2	0.1	0.3	正确
	$R=100\ \Omega$,	100	2	1.3	9.2	15	7.5	4.1	6.5	错误
	$X=4\text{ km}$	300	0.36	0.25	10	2.7	1.4	0.7	1.1	正确
l_7	$\theta=15^\circ$,	50	0	0.05	0	0.5	0.3	0.1	5.5	正确
	$R=200\ \Omega$,	100	1.9	1.2	0.75	14	7.2	3.9	11	正确
	$X=5\text{ km}$	300	0.3	0.2	0.13	2.3	1.2	0.7	3.7	正确
	$\theta=150^\circ$,	50	0	0	0	0.3	0.2	0.1	9.3	正确
	$R=100\ \Omega$,	100	1.8	1.2	0.7	13	7	3.8	15	正确
	$X=5\text{ km}$	300	0.5	0.3	0.2	3.5	1.8	0.9	10	正确
母线	$\theta=30^\circ$,	50	0.05	0.03	0.02	0.4	0.2	0.1	0.3	正确
	$R=50\ \Omega$	100	1.9	1.3	0.75	14.5	7.5	4.1	6.5	正确
		300	0.05	0.03	0.02	0.3	0.2	0.1	0.5	正确

任取几种故障状态,不同线路故障经过表决器最终选线结果见表 2。可见,采用复合判据对不同线路发生接地故障均可作出正确选择。

表 2 表决器终选结果

Tab.2 Result of final selection by majority decision system													
故障 线路	故障 状态	初选结果			得票数统计							终选 结果	
		50Hz	100 Hz	300 Hz	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇		
l ₁	$\theta=10^{\circ}$,												正确
	$R=1\ \Omega$,	l ₁	l ₁	l ₁	3	0	0	0	0	0	0		
	$X=3\text{ km}$												
l ₃	$\theta=25^{\circ}$,												正确
	$R=150\ \Omega$,	l ₃	l ₄	l ₃	0	0	2	1	0	0	0		
	$X=4\text{ km}$												
l ₇	$\theta=150^{\circ}$,												正确
	$R=100\ \Omega$,	l ₇	l ₇	l ₇	0	0	0	0	0	0	3		
	$X=5\text{ km}$												
母线	$\theta=30^{\circ}$, $R=50\ \Omega$		母线		0	0	0	0	0	0	0	正确	

4 算法适应性分析

4.1 电弧故障

输电线路多发生电弧接地故障,而故障电弧是

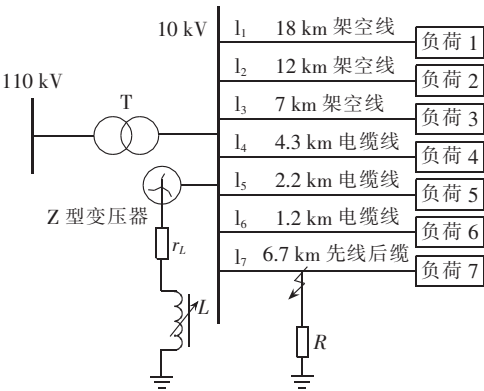


图 4 仿真模型
Fig.4 Simulation model

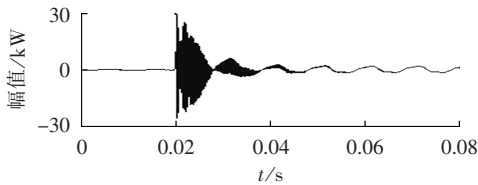


图 5 健全线路瞬时零序功率波形
Fig.5 Waveform of instantaneous zero-sequence power of healthy line

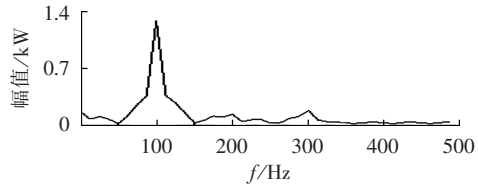


图 6 健全线路瞬时零序功率频谱图
Fig.6 Spectrum of instantaneous zero-sequence power of healthy line

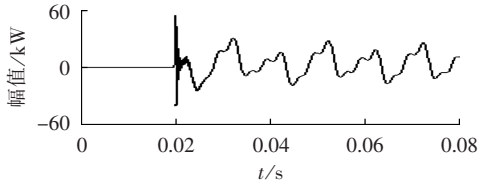


图 7 故障线路瞬时零序功率波形
Fig.7 Waveform of instantaneous zero-sequence power of faulty line

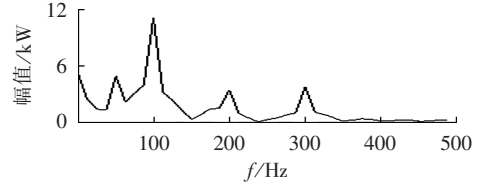


图 8 故障线路瞬时零序功率频谱图
Fig.8 Spectrum of instantaneous zero-sequence power of faulty line

一个十分复杂的物理化学过程,很难建立一个准确的数学模型^[22-23]。本文从能量守恒的角度建立电弧的简化模型^[24-25]为: $\alpha\rho^2+\beta\rho\frac{d\rho}{dt}=ui,u=\frac{\lambda i}{\rho^2}$ 。其中 α 、 β 、 λ 为系数, i 为电弧电流, ρ 为电弧半径, u 为电弧电压。采用上述模型进行仿真,设置线路 l_7 在5 km处发生单相电弧接地故障且含5次谐波时,选线结果见表3。

表 3 电弧故障选线结果
Tab.3 Result of faulty line selection for arc grounding

故障状态	频率/ Hz	瞬时零序功率工频信号/kW							终选结果
		l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	
$\theta=15^\circ$	50	0.01	0.03	0.02	0.3	0.2	0.1	42	正确
	100	1.8	1.2	0.7	13	7	3.8	35	正确
	300	0.2	0.13	0.08	1.5	0.8	0.4	19	正确
$\theta=30^\circ$	50	0	0	0	0.2	0.1	0.05	38	正确
	100	1.8	1.2	0.7	13.8	7	3.7	35	正确
	300	0.2	0.1	0.06	1.2	0.65	0.3	19	正确
$\theta=60^\circ$	50	0.01	0.1	0.04	1	0.5	0.3	23	正确
	100	1.9	1.3	0.75	14.5	7.5	4	35	正确
	300	0.1	0.05	0.03	0.6	0.4	0.3	20	正确

从表3可见,本文采用的复合选线方法对发生电弧接地故障可实现正确选线。

4.2 含随机干扰

设置馈线 l_7 在5 km处发生单相接地故障,系统叠加随机干扰噪声,信噪比为10 dB,选线结果见表4。

表 4 含干扰信号选线结果
Tab.4 Result of faulty line selection for signal with interference

故障状态	频率/ Hz	瞬时零序功率工频信号/kW							终选结果
		l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	
$\theta=5^\circ$, $R=300\ \Omega$	50	0	0	0	0.5	0.2	0.1	2.5	正确
	100	1.8	1.25	0.72	14	7.1	3.7	8.2	正确
	300	0.55	0.35	0.2	0.4	2.1	1.1	4.4	正确
$\theta=100^\circ$, $R=250\ \Omega$	50	0.1	0.1	0	1.3	0.7	0.4	1.5	正确
	100	1.8	1.2	0.7	13	7	3.8	8.5	正确
	300	0.2	0.2	0.1	2.5	1.1	0.6	4.6	正确
$\theta=165^\circ$, $R=50\ \Omega$	50	0	0	0	0.3	0.2	0	12	正确
	100	1.8	1.2	0.7	14	7	3.9	18	正确
	300	0.4	0.3	0.18	3.5	1.8	1	19	正确

以上研究表明,该复合选线方法对于系统含干扰信号时同样能可靠选出故障线路。

5 现场录波验证

云南某变电站,10 kV 母线采用单母线分段带旁路接线,共8路出线,某次单相接地故障的现场零序电压和零序电流录波曲线见图9。根据实际录波数据进行各线路瞬时零序功率计算,并分解出50 Hz、100 Hz和300 Hz几个特征频率的振荡分量见表5。

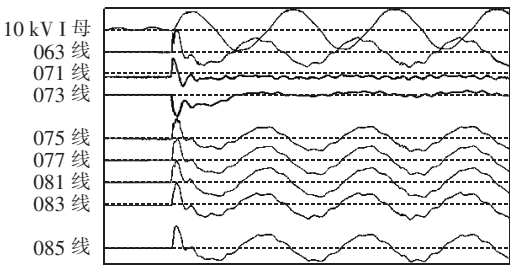


图 9 现场录波截图
Fig.9 Field wave records

表 5 特征频率零序功率
Tab.5 Instantaneous zero-sequence power of characteristic frequency

频率/Hz	各线路零序功率/W							
	063	071	073	075	077	081	083	085
50	0.4	0.5	58	2.0	4.5	2.6	0.4	6.0
100	2.5	0.1	42	8.8	19	9.1	2.0	22
300	0.3	0.1	10	0.7	1.6	0.7	0.2	2.1

由表5并依据本文提出的选线判据,选出故障线路是073回线,与实际状况一致。

6 结语

谐振接地系统发生单相接地故障时,故障信号比较复杂,加上谐波和干扰更突显其非正弦特征。用瞬时零序功率可以准确描述其故障信号频率特征。故障发生时,故障线路与非故障线路上零序功率振荡分量的成分不同,通过综合比较分析其振荡分量相应频率信号可以准确检出故障线路。该方法无需计算相位,既考虑稳态故障特征,又涉及暂态故障信息,而且多判据互补。理论分析、大量仿真和现场录波验证表明该方法有效。

参考文献:

[1] 束洪春,彭仕欣,李斌,等. 利用测后模拟的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):59-64.
SHU Hongchun,PENG Shixin,LI Bin,et al. A new approach to detect fault line in resonant earthed system using simulation after test[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):59-64.
[2] 束洪春,彭仕欣,李斌,等. 基于零序电流激励的谐振接地系统故障选线测后模拟方法[J]. 电工技术学报,2008,23(10):106-113.
SHU Hongchun,PENG Shixin,LI Bin,et al. Simulation after detecting fault line in resonant earthed system through zero sequence current motivation[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2008,23(10):106-113.
[3] 王艳松,张萌萌. 基于暂态分量的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(3):135-143.
WANG Yansong,ZHANG Mengmeng. A novel method of fault line selection by transient component for single-phase to ground fault in distribution networks[J]. Journal of China University of Petroleum:Edition of Natural Sciences,2006,30(3):135-143.
[4] 程路,陈乔夫. 基于零序瞬时功率的选线新方法[J]. 电测与仪表,2010,47(535):24-29.

- CHENG Lu, CHEN Qiaofu. A new fault-line-selection method based on zero sequence instantaneous power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(535): 24-29.
- [5] 朱丹, 贾雅君, 蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 75-78.
- ZHU Dan, JIA Yajun, CAI Xu. Transient energy to detect single-phase earthing fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 75-78.
- [6] 束洪春, 刘娟, 王超, 等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 72-76.
- SHU Hongchun, LIU Juan, WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 72-76.
- [7] 束洪春. 配电网故障选线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 23-29.
- [8] WATANABE E, STEPHAN R. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 697-703.
- [9] AREDES M, WATANABE E. New control algorithms for series and shunt three phase four wire active power filters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1649-1656.
- [10] 张金斗, 张勇, 程新功. 三相四线制系统谐波检测 $p-q-0$ 法的研究[J]. 继电器, 2006, 34(20): 53-56.
- ZHANG Jindou, ZHANG Yong, CHENG Xingong. Three-phase four-wire system harmonics detection by the $p-q-0$ method[J]. Relay, 2006, 34(20): 53-56.
- [11] 卓放, 王跃, 王兆安. 三相四线制电路中的瞬时无功功率及有源电力滤波器[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 1-4.
- ZHUO Fang, WANG Yue, WANG Zhaoan. Instantaneous reactive power and active power filter in three-phase four-wire system[J]. Electrotechnical Journal, 2001(4): 1-4.
- [12] 王茂海, 孙元章. 三相电路中功率现象的解释及无功功率的分类[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 63-66.
- WANG Maohai, SUN Yuanzhang. Analysis of power phenomenon and classification of reactive power in three-phase circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 63-66.
- [13] GHASSEMI F. New concept in AC power theory[J]. IEE Proceedings, Part C, 2000, 147(6): 417-424.
- [14] WU X, PANDA S. Analysis of the instantaneous power flow for three-phase PWM Boost rectifier under unbalanced supply voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1676-1691.
- [15] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits[C]// IPEC'83-International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan: [s.n.], 1983: 1375-1386.
- [16] KIM H, AKAGI H. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems[C]// Power Conversion Conference. Nagaoka, Japan: [s.n.], 1997: 360-366.
- [17] WATANABE E, AKAGI H, AREDE M. Instantaneous $p-q$ power theory for compensating nonsinusoidal systems[C]// 9th International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. Lagow, Poland: [s.n.], 2008: 1-10.
- [18] DEPENDBROCK M, STAUDE V, WREDE H. A theoretical investigation of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1160-1168.
- [19] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 81-82, 157-158.
- [20] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
- QI Zheng, YANG Yihan. Analysis of technology of fault line selection for single-phase-to-earth faults in neutral point non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [21] 夏小飞, 许飞. 10 kV 系统单相接地过电压的仿真计算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 75-76.
- XIA Xiaofei, XU Fei. Simulative calculation of 10 kV network single-phase grounding overvoltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 75-76.
- [22] 束洪春, 司大军, 葛耀中, 等. 高压输电线路电弧故障单端定位时域法新解[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 25-35.
- SHU Hongchun, SI Dajun, GE Yaozhong, et al. A new time-domain method for locating arc fault in EHV transmission line using one terminal data[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 25-35.
- [23] 贺博, 林辉, 符强. 交流污闪电弧动态特征探究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 177-182.
- HE Bo, LIN Hui, FU Qiang. Dynamic characters exploring of flashover arc for AC contaminated insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 177-182.
- [24] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-71.
- HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 64-71.
- [25] 王育飞, 潘艳霞, 姜建国. 基于 MATLAB 的交流电弧炉随机模型与仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 973-977.
- WANG Yufei, PAN Yanxia, JIANG Jianguo. Stochastic model of AC electric arc furnace based on MATLAB[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 973-977.

作者简介:

李斌(1965-), 男, 四川三台人, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护(E-mail: kmlb@vip.sina.com);

束洪春(1961-), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为新型继电保护与故障测距、数字信号处理及其应用、电力系统 CTI 技术等(E-mail: kmshc@sina.com)。

(下转第 94 页 continued on page 94)

- [14] 程少庚,崔杜武,刘小河. 电网络分析[M]. 北京:机械工业出版社,1993:23-25.
- [15] 苏盛,曾祥君,穆大庆. 基于 ATP 的电磁暂态自动仿真程序[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):145-148.
- SU Sheng,ZENG Xiangjun,MU Daqing. Automated electromagnetic transient simulation using ATP[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):145-148.
- [16] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001:78-82.
- [17] BASTARD P,BERTRAND P,MEUNIER M. A transformer model for winding fault studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994,9(2):690-699.
- [18] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2002:5-12.

- [19] 王维俭. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2006:37-42.

作者简介:

张 杰(1978-),男,湖南怀化人,工程师,博士,主要从事直流输电与柔性交流输电方面的研究工作(E-mail: zhangjie1@teg.cn);

王卫安(1975-),男,湖南娄底人,高级工程师,博士,主要从事大功率电力电子技术方面的研究工作(E-mail: wangwa@teg.cn);

马雅青(1975-),女,湖南醴陵人,工程师,主要从事柔性直流输电方面的研究工作(E-mail: mayq@teg.cn)。

Converter transformer modeling based on additive process and short circuit fault calculation

ZHANG Jie,WANG Weian,MA Yaqing,TANG Jianzhao,REN Tao

(CSR Research Institute of Electricity Technology & Materials Engineering,Zhuzhou 412001,China)

Abstract: A digraph of coupled circuit is made for converter transformer,where the transformer is regarded as an electric network containing coupled branches,and based on which,the additive process is applied to directly build the equations of electric network containing coupled branches and the mathematical models of converter transformer in normal condition are thus obtained. For calculating its typical internal and external faults,the mathematical models of converter transformer in the condition of interior fault are obtained by amending the correlative contribution of branches according to the change of nodes and branches. Actual examples validate the correctness of the method of mathematical modeling and fault calculation,which needs less computer memory and has higher computational efficiency,accuracy and versatility. It is suitable for the mathematical modeling of complex multi-winding transformer in normal and interior fault conditions and the calculation of arbitrary internal and external faults.

Key words: converter transformer; mathematical models; short circuit fault; electric network analysis; additive process; coupled circuit

(上接第 71 页 continued from page 71)

Faulty line detection based on instantaneous zero-sequence power for resonant earthed system

LI Bin,SHU Hongchun

(Faculty of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650500,China)

Abstract: A composite method of faulty line selection using instantaneous zero-sequence power is proposed for the single-phase-to-ground fault of resonant earthed system,and its steady-state and transient characteristics are analyzed based on the instantaneous power theory. The fault signals after coordinate transformation are used to calculate the instantaneous zero-sequence power of faulty circuit,which is then decomposed to extract its oscillating components. Because the oscillating components of faulty line are different from those of healthy lines,the oscillating components with one,two,four and six times of elementary frequency are picked out and comprehensively analyzed to detect the faulty line. This method integrates the transient and steady-state characteristics of fault and includes the harmonic signals. With clear physical meaning,it adopts multiple complementary criteria and avoids the phase analysis. Its validity is verified by simulation and field test.

Key words: instantaneous zero-sequence power; frequency characteristic; resonant earthed system; single-phase-to-ground fault; faulty line detection