

DOI: 10.7667/PSPC151543

小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究

陈博博¹, 屈卫锋², 杨宏宇², 吴蕾²

(1. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 江苏省连云港供电公司, 江苏 连云港 222000)

摘要: 在小电流接地系统中, 发生单相接地故障时, 电弧故障会经常产生。现有用于模拟电网的电弧模型大都是通过开关来实现, 与实际的电弧接地有一定的差距。将 Cassie 电弧模型和 Mayer 电弧模型结合起来, 使其更符合实际电弧接地, 并运用到 10 kV 模拟电网中。在 EMTP 中, 对中性点不接地电网、经消弧线圈接地、经高阻接地, 电弧发生在不同合闸角, 不同馈线时的情况进行了大量仿真。最后在 Matlab 中, 用小波相关分析法进行选线。结果表明, 该方法适用于大部分电弧故障, 但对于电压过零点附近发生的电弧故障有一定的局限性。

关键词: 小电流接地系统; 电弧模型; EMTP; Matlab; 小波相关分析; 故障选线

Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system

CHEN Bobo¹, QU Weifeng², YANG Hongyu², WU Lei²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Lianyungang Power Supply Company of Jiangsu Province, Lianyungang 222000, China)

Abstract: When a single phase grounding fault happened in neutral ineffectively grounding system, arc fault usually generated. Most of the existing arc models for the electric network are realized via the switch, which has a certain gap with the actual arc grounding. Firstly, this paper combines Cassie arc model with Mayer arc model to make it more in line with the actual arc grounding, and applies it to 10 kV simulation power grid. Then, a large number of simulations on the electric arc occurring in different closing phase angles and different feeders are done with EMTP in neutral point ungrounded power grid, power grid of the neutral point connected with arc suppression coil and neutral point via high resistance grounding network. Finally, the method of wavelet correlation analysis is used to select the fault line in Matlab. The results show that the method proposed can apply to most arc grounding faults, but it has some limitations for the arc fault in the vicinity of zero points of voltage.

Key words: small current grounding system; arc model; EMTP; Matlab; wavelet correlation analysis; fault line selection

0 引言

在配电网电弧接地故障仿真中, 由于电弧模型不易建立, 文献[1]是用开关的开合来代替电弧的重燃和熄灭, 文献[2]用压控开关作为实际电弧接地的理想化数学模型, 进而进行选线, 与实际的电弧接地有一定的差距; 文献[3]提出了小波变换在电弧故障选线中的应用, 但并未搭建实际意义上的电弧模型且仅对其接地时的特征进行了分析, 并未将其利用到选线中来; 文献[4]提出了小波相关分析法进行故障选线, 但并未对电弧接地故障时的情况进行详细的研究。

现有学者研究的电弧动态模型主要是 Mayer 模

型^[5-7]、Cassie 模型^[8], 而 Cassie 模型适用于电流过零前低电弧电阻状态, Mayer 模型适用于电流过零后的高电弧电阻状态, 在电弧型接地故障中, 电弧电阻是跨越低和高电阻区的^[9], 因此, 单一的模型并不能准确描述电弧燃烧的整个过程。本文将 Mayer 和 Cassie 电弧模型, 结合起来, 使其电弧电流较大时, Cassie 电弧模型起主要作用, 电弧电流较小时, Mayer 电弧模型发挥主要作用, 以模仿电弧燃烧的整个过程, 使电弧故障更加契合实际情况, 然后将此电弧模型运用到 10 kV 的配网接地故障中。并运用小波相关分析的方法对电弧接地的情况进行了选线仿真分析, 为此方法在电弧故障选线中的实际应用提供一定的依据。

1 电弧模型的建立

由于 Mayer 和 Cassie 电弧模型均不能完全地描述电弧的特性, 为了使电弧模型更加精确, 需将两者结合起来^[10]。

Mayer 电弧模型为

$$\frac{1}{g_m} \times \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{e \times i}{p_{loss}} - 1 \right) \quad (1)$$

式(1)中: g_m 为 Mayer 电弧模型动态电导; τ_m 和 p_{loss} 分别表示电弧时间常数和电弧燃烧过程中的耗散功率; e 为弧柱中的电场强度; i 为电弧电流。该模型建立的条件是: 电弧弧柱始终是圆柱体通道, 耗散功率不考虑对流作用, 辐射和热传导起主要作用。

Cassie 电弧模型为

$$\frac{1}{g_c} \times \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{u_c^2} - 1 \right) \quad (2)$$

式(2)中: g_c 为 Cassie 模型的动态电导; 电弧时间常数和电弧电压常数分别用 τ_c 和 u_c 表示, u 表示电弧电压。且假设电弧圆柱形通道的截面温度分布均匀, 通道直径的变化引起电弧横截面的变化, 进而导致电导发生变化, 而能量耗散由气流的流动引起。

以上 Mayer 和 Cassie 电弧模型中的参数在电弧燃烧过程中并不是恒定不变的, 但由于其在电流过零点附近, 变化并不明显, 因此, 可以将这些参数近似为常数, 进而得到 Cassie-Mayer 电弧模型。

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (3)$$

式(3)中: g 为电弧电导; g_c 为 Cassie 电弧模型电导; g_m 为 Mayer 电弧模型电导; 当电弧电流较小时, Mayer 电弧模型起着主要的作用, 而在电弧完全燃烧时, 电弧电导较大, 此时, Cassie 模型起主要作用。

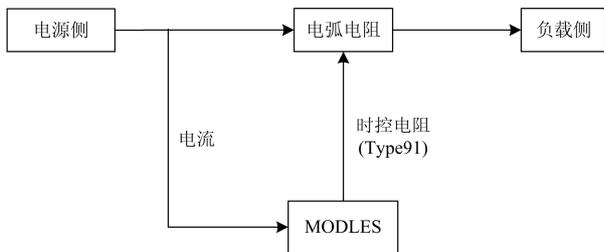


图 1 电弧模型框图

Fig. 1 Diagram of arc model

如图 1 为电弧模型的框架图。这个框图可用 EMTp-models 来实现, 输入为电弧电流, 经过式(3)的处理得到电弧电导, 进而得到电弧电阻, 送给时

控电阻模型, 从而得到电弧模型, 如图 2 所示。

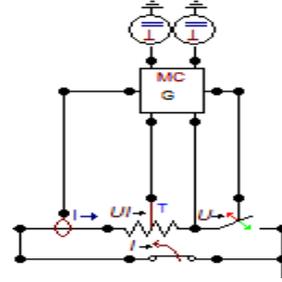


图 2 电弧模型

Fig. 2 Arc model

对第 3 节所示的模型在 EMTp 中搭建模型, 故障点采用如上所述的电弧模型, 假设在 0.015 s 时产生电弧, 此后电弧稳定燃烧, 得到的电弧电压、电弧电流的波形如图 3、图 4 所示。

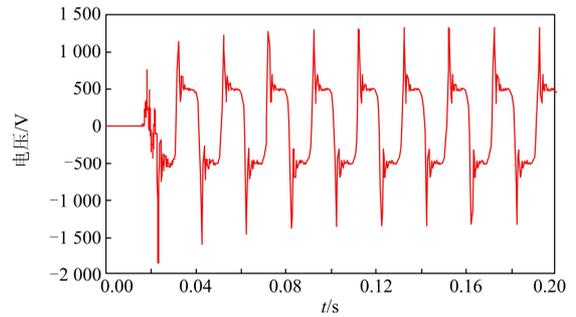


图 3 电弧电压仿真波形

Fig. 3 Simulation of arc voltage

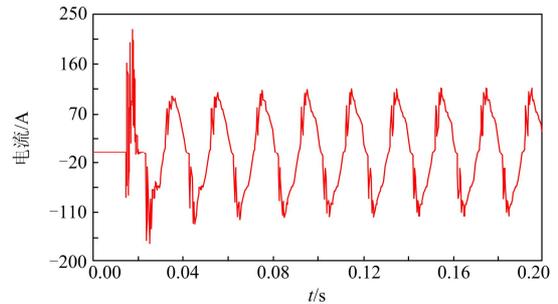


图 4 电弧电流仿真波形

Fig. 4 Simulation of arc current

由仿真波形可以看到, 电弧电压畸变比较严重, 其波形类似于“马鞍”型。电弧电流在刚起弧时, 电弧电流突然增大, 在电弧趋于稳定时, 电流近似于正弦波, 有明显的“零休”现象。

图 5 和图 6 为采集到的稳态时的电弧电压和电流的录波波形, 其波形与仿真波形基本一致, 说明电弧仿真模型很好地表现了电弧的特性。

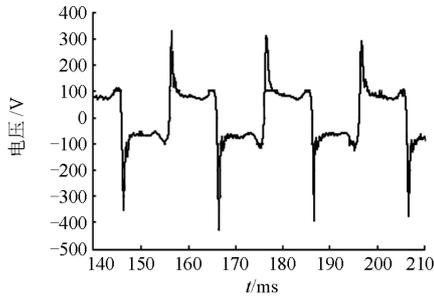


图 5 电弧电压实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms of arc voltage

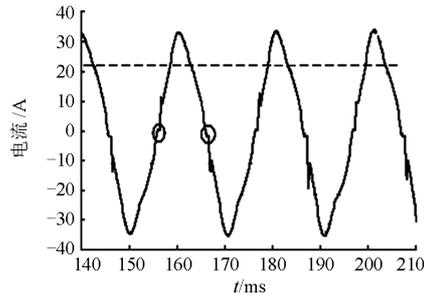


图 6 电弧电流实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of arc current

2 小波相关分析选线原理

小波变换将时域内的函数投影到二维时域和频域的平面上, 通过时频窗口的调整, 进而反映某一点处的局部时域频域特性, 正是由于这种特性, 用来分析单相故障时产生的微弱的非工频信号具有很强的适用性^[11-12]。

多尺度分析作为小波分析中的重要概念, 其二尺度方程为^[13]

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)\varphi(2t-n) \quad (4)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n)\psi(2t-n) \quad (5)$$

式中: $\varphi(t)$ 和 $\psi(t)$ 分别为尺度函数和小波函数; 序列 $h(n)$ 和 $g(n)$ 分别是由尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 确定的, 并且具有滤波特性。

本文选择 DB15 小波作为小波母函数, 用 Mallat 算法对原始信号进行分解, 长度为 N 的原始数据, 经过小波分解后变成 $N/2$ 的近似分量, 得到的高频分量和低频分量分别通过具有滤波特性的序列获得。在每次分解后, 信号采样频率减小一半, 对得到的低频分量一直分解, 然后提取某个特征频段内的信号, 进行下一步的处理。

通过小波分析可以将信号分解到某个特征频段, 从而避免了有基波、现场噪声等多种其他信号

的影响, 然后再利用相关分析这一工具对特征频段内的信号进行处理可以有效提高选线的准确性。图 7 为选线流程图。

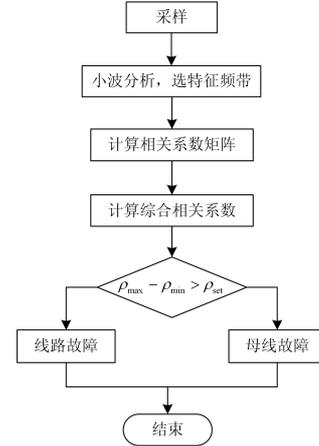


图 7 故障选线算法流程图

Fig. 7 Fault line selection algorithm flow chart

首先, 对原始电流信号进行采样, 采样频率为 10 kHz; 由于 db 系列小波的正交性, 紧致性, 对不规则信号较为敏感, 故选择 db15 小波对零序电流进行小波变换。在中性点不接地或经消弧线圈接地电网中, 当发生单相电弧型接地故障时, 线路中的零序暂态电流的能量主要集中在 1 000~1 500 Hz^[14-15], 故对信号进行 5 层小波分解, 提取第四层的高频系数 (对应频率为 625~1 250 Hz)。

接着对这些提取出来信号进行两两相关分析^[16]。信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的均方根分别为

$$\sigma_x = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\sigma_y = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \right]^{1/2} \quad (7)$$

于是, 相关运算可以归一化为

$$\rho_{xy} = \frac{r_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

即相关分析匹配度为

$$\rho_{xy} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \left[\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \right]^{-1/2} \quad (9)$$

式(9)中: ρ_{xy} 被称为互相关系数, 它的取值区间为 $[-1, +1]$, +1 表示两个信号 100% 正相关, -1 表示它们 100% 负相关, 即形状完全一样, 但相位正好相反, 0 值表示零相关, 就是说两个信号完全独立, 毫无关系。

然后, 形成相关系数矩阵。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据相关系数矩阵求取综合相关系数为

$$\rho_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \rho_{ij} \quad (11)$$

得到综合相关系数序列 $[\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n]$ 。最后, 比较综合相关系数, 当最大综合相关系数与最小综合相关系数之差小于 Δ_ρ 时, 判定母线故障, 否则为最小的综合相关系数对应的线路故障。

3 仿真实验

配电网单相电弧接地故障如图 8 所示, 该系统由一个 110 kV/10 kV 的变压器和 5 条馈出线组成, 变压器接线为 Y/Y₀。线路的正序参数为: $R_1=0.17 \Omega/\text{km}$, $L_1=1.2546 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1=9.211 \text{ nF}/\text{km}$; 零序参数为: $R_0=0.3949 \Omega/\text{km}$, $L_0=4.6533 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0=4.7561 \text{ nF}/\text{km}$, 线路 1 至线路 5 的长度分别为: 20, 10, 13, 14, 15 km, 变压器低压侧中性点可以分为不接地, 经消弧线圈接地, 经高阻接地。

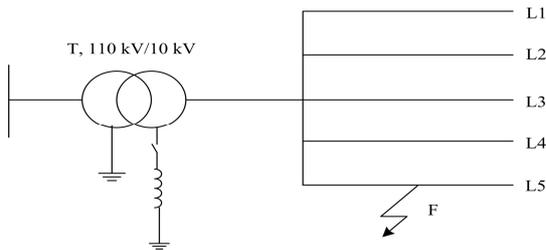


图 8 配电网仿真模型

Fig. 8 Distribution network simulation model

在该电弧模型的基础上, 用 EMTP 对中性点经高电阻接地, 中性点不接地, 中性点经消弧线圈接地进行了大量的仿真, 并采集零序电流, 将数据送入 Matlab 中进行分析处理。

4 结果分析

对中性点不接地和经高阻接地电网, 仿真在不同故障不同时刻, 发生单相电弧接地故障, 并用小波相关分析法进行选线, 得到的结果如表 1 所示。

在中性点不接地电网中, 馈线 4 在不同距离, 不同故障时刻发生电弧型单相接地故障, 其零序电流, 随着故障合闸角的增大, 零序暂态电流幅值显著增大。如图 9 所示为不接地电网发生单相接地故障, 故障角为 90°时的零序电流波形。由表 1 所示的选线结果可以看出, 小波相关分析法可以很好地应用于中性点不接地电网的不同合闸角, 不同距离的线路中。

在中性点经高阻接地的电网中(该仿真中所用的电阻为 200 Ω), 由表 1 可以看到, 当故障合闸角为 0°时, 发生了选线错误。如图 10 所示, 为故障合闸角为 0°时, 非故障线路与故障线路的零序电流波形。由于中性点接地电阻很大, 故障合闸角为 0°时, 故障线路零序暂态电流会很小, 而稳态成分是零序电流的主要部分, 因此虽然非故障线路与故障线路的零序电流极性相反, 但由于故障线路暂态电流成分很少, 故在特征频带内进行相关分析无法正确选出故障线路。随着故障合闸角的增大, 零序暂态电流增大, 故障线路能被正确选出。

表 1 故障选线结果

Table 1 Results of fault line selection

故障线路	故障角/(°)	故障距离/km	中性点 接地方式	综合相关系数					结果
				ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	
4	0	12	不接地	0.499 7	0.499 9	0.499 9	-0.999 9	0.499 9	正确
5			高阻	0.839 5	0.840 1	0.840 3	0.839 7	0.359 7	错误
4	15	2	不接地	0.497 6	0.498 9	0.499 2	-0.999 2	0.499 3	正确
5			高阻	0.669 8	0.674 9	0.674 6	0.673 5	-0.303 0	正确
4	30	4	不接地	0.499 8	0.499 9	0.499 9	-0.999 9	0.499 9	正确
5			高阻	0.506 7	0.506 6	0.506 7	0.506 8	-0.972 7	正确
4	45	4	不接地	0.498 9	0.499 2	0.499 2	-0.999 5	0.499 0	正确
5			高阻	0.573 1	0.573 9	0.574 7	0.573 3	-0.704 4	正确
4	60	6	不接地	0.498 8	0.499 3	0.499 6	-0.999 6	0.499 6	正确
5			高阻	0.599 6	0.600 0	0.600 1	0.595 7	-0.596 2	正确
4	75	6	不接地	0.498 0	0.498 9	0.498 9	-0.999 1	0.498 0	正确
5			高阻	0.543 7	0.544 0	0.544 0	0.540 5	-0.819 4	正确
4	90	12	不接地	0.497 1	0.499 1	0.498 7	-0.999 1	0.499 0	正确
5			高阻	0.589 2	0.589 4	0.589 4	0.588 5	-0.642 7	正确

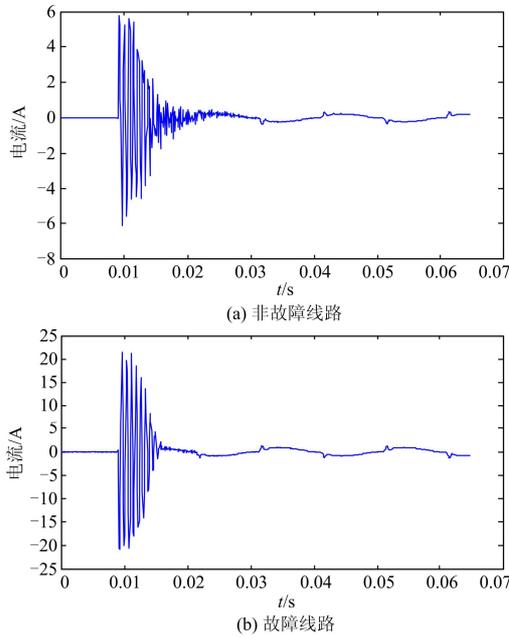


图 9 中性点不接地电网零序电流波形

Fig. 9 Zero-sequence current waveforms of ungrounded grid

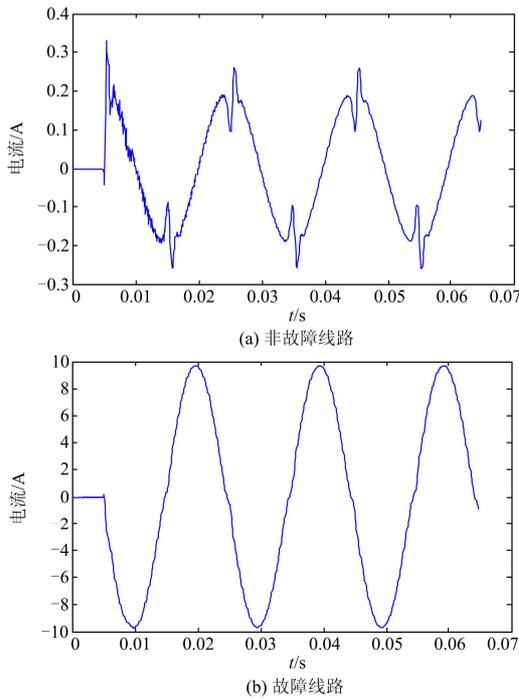


图 10 中性点经高阻接地电网零序电流波形

Fig. 10 Zero sequence current waveforms of neutral point connected with high impedance grid

中性点经消弧线圈接地电网中, 故障线路 4 在故障合闸角为 0° 和 90° 时的零序电流波形分别如图 11(a)和(b)所示, 可看到在同一线路同一故障距离, 不同故障合闸角时发生故障, 故障角为 0° 时, 零序

暂态电流相对较小; 故障角为 90° 时, 零序电流暂态分量较大, 稳态分量由于消弧线圈的补偿作用, 相对较小。经过数据处理后, 不同故障合闸角时, 得到的选线结果如表 2 所示。

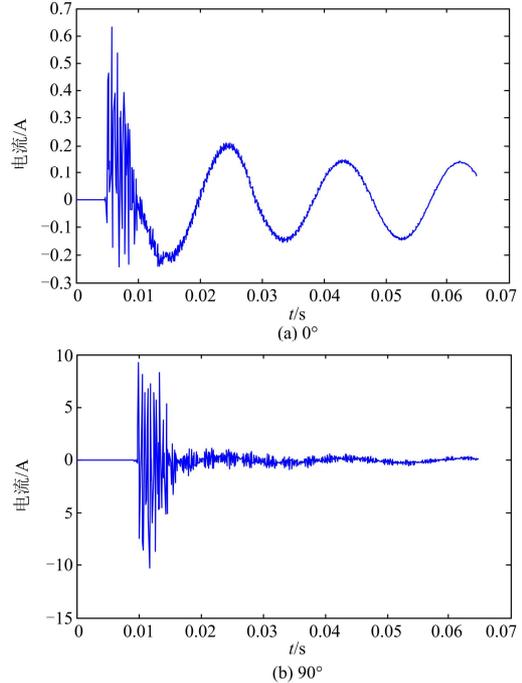


图 11 中性点经消弧线圈接地电网, 不同故障角, 故障线路零序电流波形

Fig. 11 Zero sequence current waveforms of fault line in the grid of neutral point connected with suppression coil (different fault switching angle)

表 2 中性点经消弧线圈接地选线结果

Table 2 Line selection results of the grid of neutral point connected with suppression coil

故障线路	故障合闸角/ $^\circ$	故障点距离/km	综合相关系数					结果
			ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	
1	0	4	-0.999 0	0.500 1	0.500 2	0.500 3	0.500 3	正确
		2	0.499 9	-0.999 4	0.499 9	0.499 9	0.500 0	正确
		3	0.500 2	0.500 3	-0.998 9	0.500 3	0.500 3	正确
		4	0.500 1	0.500 2	0.500 2	-0.998 9	0.500 3	正确
		5	0.489 9	0.498 3	0.498 4	0.498 6	-0.993 5	正确
		母线	0	0.988 8	0.997 1	0.997 1	0.997 1	0.997 2
1	90	4	-0.997 8	0.493 6	0.497 5	0.497 3	0.497 2	正确
		2	0.472 0	-0.990 2	0.483 4	0.490 2	0.487 9	正确
		3	0.499 6	0.499 5	-0.999 7	0.499 7	0.499 0	正确
		4	0.487 5	0.492 7	0.493 8	-0.994 9	0.491 5	正确
		5	0.494 5	0.497 0	0.496 9	0.497 6	-0.997 8	正确
		母线	0	0.886 1	0.907 4	0.769 5	0.640 8	0.906 4

在实际电网中，很容易发生间歇性电弧故障^[7]，据工频熄弧理论，即故障相在工频电压最大值时发生绝缘击穿，接地电弧随之产生，在工频电流过零时熄灭，也就是每经过 0.5 个工频周期，接地电弧重燃一次^[18]。本文用该理论仿真间歇性电弧接地。

在故障相 A 相与上述电弧模型间设置一个开关，开关闭合，电弧模型接入产生电弧故障，开关断开，即电弧熄灭。电弧在 0.01 s 时发生第一次电弧型接地故障，0.02 s 时熄灭；随后重燃和熄灭的时间为 0.03 s，0.04 s，0.05 s，0.06 s，即发生 3 次电弧故障，故障馈线和非故障馈线的零序电流波形如图 12 所示；间歇性电弧故障分别发生在馈出线和母线，所得到的选线结果如表 3 所示，无论间歇性电弧故障发生在馈出线还是母线，均能被选出。

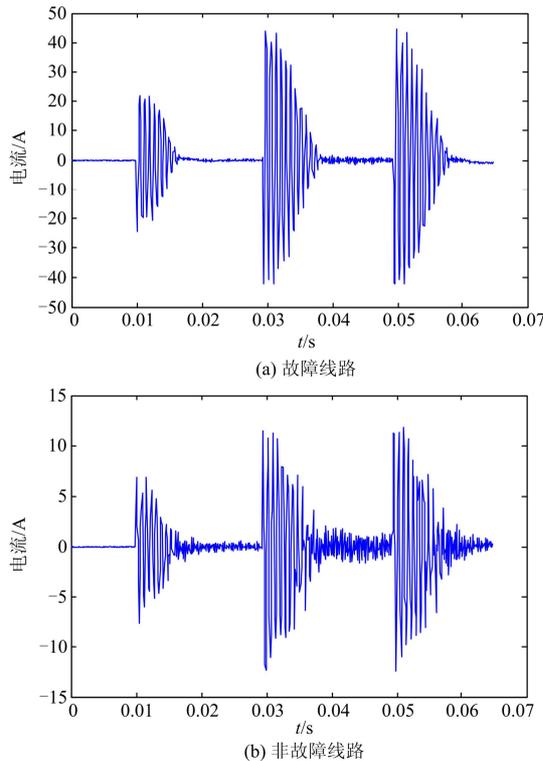


图 12 间歇性电弧接地零序电流波形

Fig. 12 Zero sequence current waveforms of intermittent arc grounding system

表 3 间歇性电弧接地选线结果

Table 3 Line selection results of intermittent arc grounding

故障线路	故障点距离/km	综合相关系数					结果
		ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	
4	6	0.498 8	0.499 3	0.499 4	-0.999 5	0.499 2	正确
5	3	0.487 6	0.494 7	0.494 9	0.495 4	-0.995 7	正确
母线	0	0.913 7	0.977 6	0.975 9	0.977 5	0.975 4	正确

5 结论

本文将适用于低电弧电阻的 Cassie 电弧模型和适用于高电弧电阻的 Mayer 电弧模型，用并联的方式结合起来，大电流时，Cassie 模型起主要作用；反之，Mayer 模型起主要作用。这样就弥补了两个模型的不足，将混合模型应用于 10 kV 小电流接地电网中，使电弧型接地更符合实际情况。

用 EMTP 大量仿真中性点不接地，中性点经消弧线圈接地，中性点经高阻接地时，在不同合闸角，不同馈线发生电弧故障和间歇性电弧故障时的情况；在 Matlab 中用小波分析对特征频带的数据进行处理，然后用相关分析法进行选线，结果表明，小波相关分析法对于电弧型接地故障基本适用，但对于电压过零点附近发生的电弧故障有一定的局限性。

本文对小波相关分析法在电弧故障选线中应用的探讨，对实际的电弧接地提供了一定的依据；但由于实际电弧受风，空气的干湿度等环境因素的影响较大，因此还需进行进一步的探究。

参考文献

- [1] 赵新红, 袁洪, 车伟, 等. 小波变换在小电流接地电弧故障选线中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 21-23.
ZHAO Xinhong, YUAN Hong, CHE Wei, et al. Study of arc-grounding fault selection based on wavelet analysis for the small current neutral grounding system[J]. High Voltage Technology, 2005, 31(10): 21-23.
- [2] 束洪春, 肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 58-61.
SHU Hongchun, XIAO Bai. A transient-based study of fault line selection for single-phase to ground faults on distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 58-61.
- [3] 赵新红, 车伟. 基于小波变换的小电流接地系统电弧故障选线[J]. 电力科学与工程, 2003, 22(4): 22-25.
ZHAO Xinhong, CHE Wei. Arc-grounding fault selection for small current neutral grounding systems based on wavelet analysis[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, 22(4): 22-25.
- [4] 熊姗霞, 黄洪全, 杨兆阳. 基于小波包及相关分析的故障选线方法[J]. 计算技术与自动化, 2013, 32(3): 16-20.
XIONG Shanxia, WONG Whole, YANG Zhaoyang. A method for fault line selection based on fault line selection on wavelet packets and correlation analysis[J]. Computing Technology and Automation, 2013, 32(3): 16-20.
- [5] 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): 64-66, 70.
HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 64-66, 70.
- [6] 金海望, 杨炳元, 郑日红, 等. Matlab7.0 下电弧模型的建立与分析[J]. 电气技术, 2011(12): 90-92.
JIN Haiwang, YANG Bingyuan, ZHENG Rihong, et al. Establishment and analysis of arc model under the Matlab7.0[J]. Electric Technology, 2011(12): 90-92.
- [7] 于然, 付周兴, 王清亮, 等. 基于 MATLAB 的电弧建模仿真及故障分析[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 95-99, 106.
YU Ran, FU Zhouxing, WANG Qingliang, et al. Modeling simulation and fault analysis of arc based on MATLAB[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 95-99, 106.
- [8] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [9] 顾荣斌, 蔡旭, 陈海昆, 等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 63-67.
GU Rongbin, CAI Xu, CHEN Haikun, et al. Modeling and simulating of single-phase arc grounding fault in non-effective earthed networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 63-67.
- [10] 李爽, 金鑫, 毕海涛, 等. 可变间隙电弧模型下特高压气体绝缘变电站快速暂态过电压的数值计算[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1306-1312.
LI Shuang, JIN Xin, BI Haitao, et al. Numerical calculation on very fast transient overvoltage of UHV gas insulated substation by variable gap arc model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1306-1312.
- [11] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [12] 杨健翔, 常仲学, 豆敏娜, 等. 一种配网单相接地选线的频带自适应获取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 60-66.
YANG Jianxiang, CHANG Zhongxue, DOU Minna, et al. A novel frequency band self-adaptive selection method of fault line selection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 60-66.
- [13] 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. Fault line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [14] 陈奎, 唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(16): 5-9.
CHEN Kui, TANG Yi. Analysis of detecting fault line of arcing grounded fault in isolated neutral system[J]. Relay, 2005, 33(16): 5-9.
- [15] 李震球, 王时胜, 吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A novel frequency band self-adaptive selection method of fault line selection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [16] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 76-81.
WANG Shao, ZHU Jiangfeng. Faulty line selection of single-phase to ground fault in distribution network based on improved correlation analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 76-81.
- [17] 王倩, 谭王景, 叶赞, 等. 基于 ATP-EMTP 的电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 16-21.
WANG Qian, TAN Wangjing, YE Zan, et al. Modeling and simulating of arc grounding fault based on ATP-EMTP[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 16-21.
- [18] 徐兵, 卢继平, 潘雪. 基于对地电容与过渡电阻识别的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 101-105.
XU Bing, LU Jiping, PAN Xue. Method to detect fault feeder based on identifying grounding capacitance and transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 101-105.

收稿日期: 2015-09-01; 修回日期: 2015-11-16

作者简介:

陈博博(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网故障选线与定位; E-mail: 1553321327@qq.com

屈卫锋(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统通信与电力系统自动化方面的工作;

杨宏宇(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统通信方面的工作。

(编辑 姜新丽)