

DOI: 10.7667/PSPC151201

基于磁场测量的配电网单相接地选线及定位新方法

田书, 王亚彩, 王晓卫, 尚鹏辉

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 输电线路发生接地故障时, 架空线下方磁场能反映线路故障信息。输电线路短路电流大小不同, 线路下方磁场相应地不同, 即输电线路下方磁场的变化能够完全反映线路中电流的变化, 磁场可以应用到电力系统保护中。配电网多为单端电源供电方式, 针对配电网的复杂性及传统定位方法精度不高提出了一种基于磁场的非接触式故障选线及定位的新方法。利用磁阻传感器非接触测量杆塔下方磁场, 根据磁场的幅值和相位选出故障线路, 确定故障点位置。磁阻传感器测量精度高, 成本低, 故障距离可以确定在两个杆塔之间。利用 MATLAB 建立线路模型, 仿真验证了理论的可行性。

关键词: 磁场; 架空线; 配电网; 故障选线; 故障定位

A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network

TIAN Shu, WANG Yacai, WANG Xiaowei, SHANG Penghui

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: When transmission line ground fault occurs, the magnetic field below the overhead line reflects the line fault information. Short-circuit current along the transmission line changes, the magnetic field below lines is different correspondingly, it means that changes on magnetic field below the transmission lines can fully reflect the changes in current. Distribution network is mostly single-ended power supply. Since distribution network is complexity and the accuracy is low, a new non-contact magnetic field measurement based method is provided to detect faulty line and locate fault for single phase to ground fault occurred in distribution network. The magnetoresistive sensors installed on the towers can non-contact measure the magnetic field, the fault line and point of failure are solved according to the magnetic field amplitude and phase. Magnetoresistive sensor measurement accuracy is high and it is low cost, the fault span can be determined between two towers. MATLAB is used to establish a line model, simulation result shows the feasibility of the theory.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 6140312).

Key words: magnetic field; overhead lines; distribution network; fault line; fault location

0 引言

小电流接地系统因具有供电可靠性高和单相接地故障时对设备冲击小的优点而在我国配电网中广泛应用。配电网配电线路较短, 中性点主要采用不接地或经消弧线圈接地方式, 多为单电源供电方式。单相接地是配电网的常见故障, 占线路总故障的 70%~80%, 在发生单相故障后允许带故障运行 1~2 h^[1]。

当配电网发生故障时, 应尽快选出故障线路。

人们对此进行了大量的研究, 提出了基于不同原理的多种选线方法。目前故障选线的方法主要有稳态法^[2-3]、暂态法^[4-6]、信号注入法^[7]和选线方法的多判据融合^[8-9]等。基于稳态量的选线方法稳态信号数值小, 容易造成选线误判; 基于暂态量选线方法虽然数值较大易于测量, 但受电弧不稳影响, 而且绝对量的整定存在困难; 注入法存在增加附加设备、注入信号微弱、选线可信度不高的缺点。因此, 理论上虽有各种选线方案, 但实际应用的效果并不理想。

对于配电网, 由于其结构复杂, 故障点定位一直也是故障测距研究中的难题^[10]。在线路故障后迅

速准确地找到故障点, 不仅能及时修复线路和保证可靠供电, 而且对电力系统的安全稳定和经济运行都有十分重要的作用。目前故障定位的方法主要有行波法和阻抗法。文献[11]提出了考虑电流行波极性和电压行波极性的综合行波极性判别法。在配电网多分支下的短线路中, 硬件和软件都无法实现行波法准确定位。文献[12]采用分布参数建模, 利用故障点电压瞬时值过零点时刻计算测量阻抗, 提出了一种新的单端故障测距方法。阻抗法主要适用于中性点有效接地配电系统, 对于中性点非有效接地配电系统, 其应用受到较大限制。而且阻抗法误差较大, 其定位精度受负荷变化、过渡电阻等因素的影响较大, 无法排除伪故障点。文献[13]针对双端电源超高压输电线路, 通过检测下方磁场的相位进行故障测距。

随着配电网综合自动化技术的发展和用户对供电质量要求的不断提高, 原有配电网中的馈线故障检测方法已不能满足需求。如何快速、准确地对配电网故障进行诊断定位, 提高配电网运行可靠性已成为人们比较关注的问题^[14]。配电网多为单端供电, 本文针对配电网提出了一种利用磁阻传感器非接触式测量线路下方磁场进行故障选线和定位的新方法。磁阻传感器响应速度在 0~100 kHz 或以上, 供电电压在 1~5 V, 工作温度在 -40~150℃, 分辨率小于 70 μGs, 其灵敏度和线性度等各方面的性能明显优于霍尔器件。利用磁阻传感器非接触测量杆塔下方磁场, 通过磁场的幅值和相位选出故障线路, 定位故障点。相比传统的直接接触式检测方法, 磁阻传感器能非接触线路准确检测架空线下方三维磁场, 提高了电气安全性, 检测精度高, 故障定位可以精确到一个跨距; 另外其成本低, 工作电压低, 微功耗, 可以内置后备电池, 工作可靠; 在杆塔下方易安装, 可以进行不断电安装及检修。

1 架空线路下方磁场特性分析

架空输电线路周围的工频电磁场, 虽随时间变化, 但变化很缓慢, 此时可以忽略电磁感应作用, 即输电线路的工频电磁场属于准静态电磁场。输电线路工频交变电场是一种准静态场, 工频磁场仅由电流产生, 即可以认为工频电场和磁场是分开的。在一般情况下, 计算架空线下的磁场时只考虑处于空间的导线, 而不考虑它的镜像已足够精确^[15-16]。实践应用表明, 当输电线路距离大于 20 m 时产生的磁场和无限长直导线产生的磁场差异很小, 因此, 可将输电线路近似看成无限长直导线。

忽略地磁场的作用, 无限长直导线在检测点产生的磁场为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \quad (1)$$

式中: ρ 为导线距检测点的距离; μ_0 为真空磁导常数; I 为导线中流过的电流。

三相水平排列, 在与三相导线垂直的平面上建立坐标系, 如图 1 所示。三相坐标为 (X_k, Y_k) , $k=(1, 2, 3)$, 检测点 P 的坐标为 (x, y) , 设导线无限长并与地面平行。

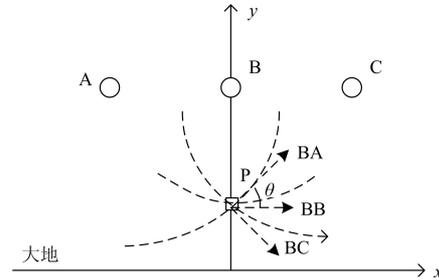


图 1 水平排列的三相导线与检测点坐标系

Fig. 1 Reference frame of level overhead lines and detection

则

$$B_A = \frac{\mu_0 i_A}{2\pi\rho_A} \quad (2)$$

$$B_B = \frac{\mu_0 i_B}{2\pi\rho_B} \quad (3)$$

$$B_C = \frac{\mu_0 i_C}{2\pi\rho_C} \quad (4)$$

式中: i_A 、 i_B 、 i_C 为三相电流; ρ_A 、 ρ_B 、 ρ_C 为三相导线距离测量点的距离。

架空线下产生的磁场由三相电流共同产生, 则检测点的磁感应强度是由 A、B 和 C 三相单独存在时在该点产生的磁场的矢量和。如图 1 所示, 在 P 点处, BA、BB、BC 为 ABC 三相产生的磁场方向, BA 是以 A 为圆心 PA 为半径的圆在 P 点处的切线。同理 BB 垂直于 PB, BC 垂直于 PC。

P 点磁场沿 X 轴的分量

$$B_x = B_A \cos\theta + B_B + B_C \cos\theta \quad (5)$$

沿 Y 轴的分量 $B_y = B_A \sin\theta - B_C \sin\theta$ (6)

沿 Z 轴的分量 $B_z = 0$ (7)

则 P 点的磁场为 X、Y、Z 轴方向的矢量和:

$$\begin{aligned} B &= i_x B_x + i_y B_y + i_z B_z = \\ &= i_x [B_B + (B_A + B_C) \cos\theta] + \\ &+ i_y [(B_A - B_C) \sin\theta] + i_z 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: i_x 、 i_y 、 i_z 分别是三维磁场 X、Y、Z 轴的单位矢量; B_A 、 B_B 、 B_C 是 ABC 三相单独存在时产生的磁场强度。

2 配电网单相接地故障电流分析

配电网单相故障系统模型如图 2 所示。其中, C_{01} 、 C_{02} 和 C_{0B} 分别是各线路的对地电容, 系统馈线 L_2 中 C 相发生单相接地故障。

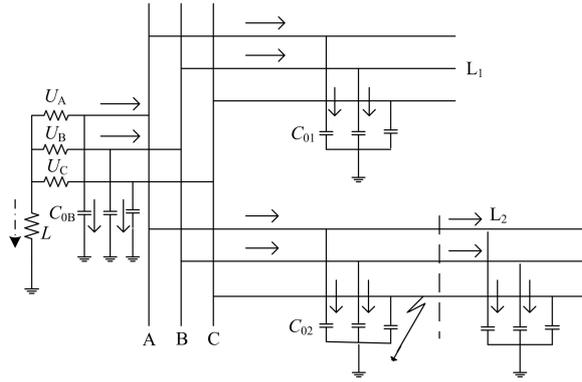


图 2 配电网单相故障系统模型

Fig. 2 Model of the single-phase fault system

当 C 相发生单相接地故障, 故障相电压降低(金属性接地时相电压降低为 0), 健全相电压升高。

对于非故障线路, 非故障相电容电流升高, 故障相电容电流几乎为零。

对于故障线路, 径向传输系统只有发送端有电源, 电源侧线路通过故障点接地与大地和电源形成回路, 线路流有全系统非故障元件对地电容电流之总和, 故障相电流显著增大。

3 输电线路故障选线及故障定位

3.1 故障选线与故障定位

单端配电网的单相短路故障如图 3 所示。

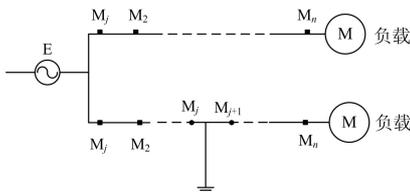


图 3 单端配电网单相接地故障示意图

Fig. 3 Single-phase fault schematic diagram of single-ended distribution network

图中, E 为电源, M_1, M_2, \dots, M_n 分别为沿各条线路在杆塔上安装的磁阻传感器。

由于磁阻传感器能在三维空间里分别测量磁场的三个分量, 所以它能够完全反映三相电流的变化。根据毕奥-萨伐尔定律, 架空线的磁场由三相电流叠加而成。电力系统正常运行时, 架空线的三相合成的磁场处于正常稳态, 当发生单相接地故障时, 架

空线下的三维磁场稳态发生变化。单相接地故障时, 对于正常线路, 在故障前后磁场发生突变, 但任意时刻, 沿线路磁场均相同。对于故障线路, 故障点流出整个系统非故障相的电流和, 带故障运行较正常运行时磁场稳态发生改变, 且在故障点处突变, 即故障点前和故障点后磁场的幅值和相位均不同。据此可以选出故障线路及确定故障点。

通过检测输电线路下方磁场进行故障选线。假设各杆塔测量点数据分别为 M_1, M_2, \dots, M_n , 若对于任意时刻 t , 任意传感器测量点 $0 < i < n$, 有

$$M_i = M_{i+1} \quad (9)$$

则为非故障线路。

若故障后存在 $0 < i < n$, 使

$$|M_i| - |M_{i+1}| > 0$$

$$\arg(M_i) - \arg(M_{i+1}) > 0 \quad (10)$$

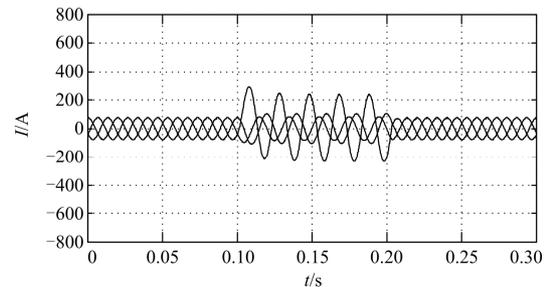
则为故障线路, 并确定故障点在 i 与 $i+1$ 两个测量点之间。

3.2 实例仿真

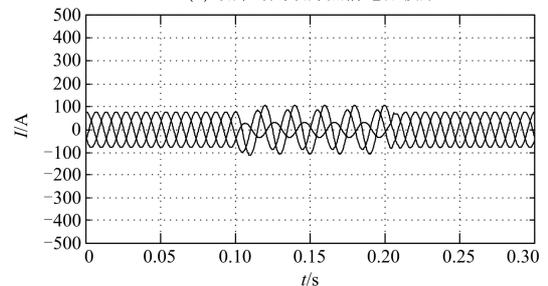
利用 Matlab 仿真平台对配电网进行故障仿真, 配电网电压等级为 10 kV, 两条线路均为 6 km, 正序参数为 $0.01273 \Omega/\text{km}$, $0.9337 \text{ mH}/\text{km}$, $0.01274 \mu\text{F}/\text{km}$, 零序参数为 $0.3864 \Omega/\text{km}$, $4.1264 \text{ mH}/\text{km}$, $0.007751 \mu\text{F}/\text{km}$ 。线路负荷分别为 1 MV 和 2 MV, 三相系统采用 Y 型连接方式, 系统工作频率为 50 Hz, 采用过补偿 10%。

故障后故障线路故障点前、故障点后和正常线路任意测量点的电流如图 4 所示。

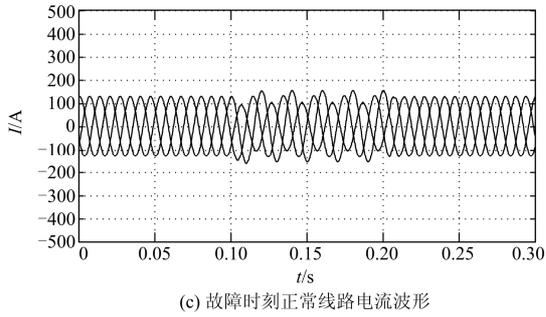
正常线路和故障线路在故障前后磁场稳态分布如图 5、图 6 所示。



(a) 故障时刻故障点前电流波形



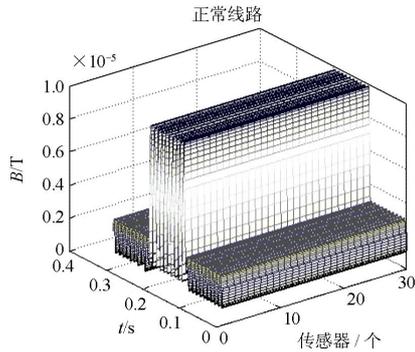
(b) 故障时刻故障点后电流波形



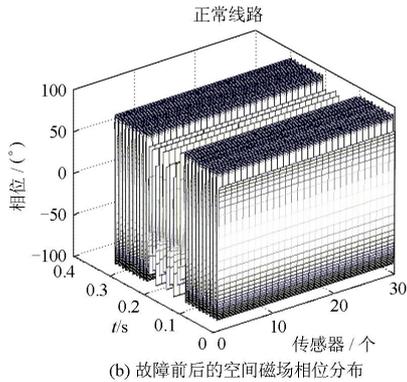
(c) 故障时刻正常线路电流波形

图 4 故障时刻电流波形

Fig. 4 Current waveform under fault



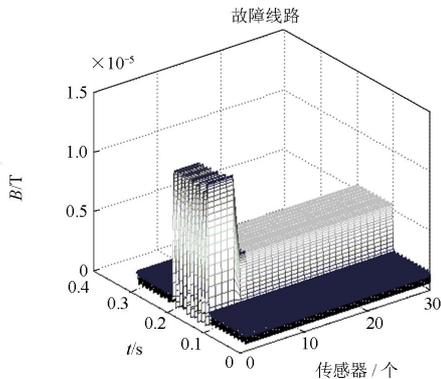
(a) 故障前后的空间磁场幅值分布



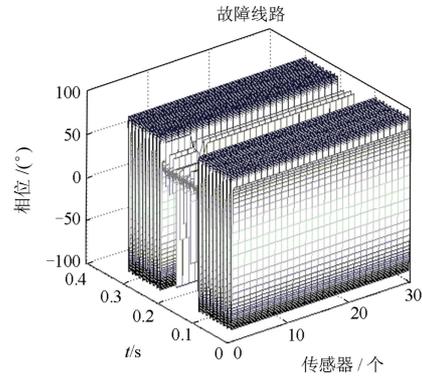
(b) 故障前后的空间磁场相位分布

图 5 正常线路故障前后的空间磁场分布

Fig. 5 Distribution of the magnetic field along normal line at pre-fault and post-fault



(a) 故障前后空间磁场幅值分布



(b) 故障前后空间磁场相位分布

图 6 故障线路故障前后空间磁场分布

Fig. 6 Distribution of the magnetic field along fault line at pre-fault and post-fault

从图中可以看出，对于故障线路，故障前后线路磁场的幅值和相位分布均发生明显改变，且故障点前与故障点后比较，幅值和相位均增大。对于正常线路，故障前后线路磁场的幅值和相位分布均发生明显改变，但磁场的幅值和相位沿线路未发生变化。

故障后磁场幅值和相位如图 7、图 8 所示。

图 7 和图 8 给出了故障后(0.1~0.2 s)故障点前、故障点后以及正常线路磁场幅值和相位。通过比较，故障后故障点前后磁场幅值和相位在故障点处发生突变。

故障后时刻沿故障线路和正常线路磁场的幅值和相位分布如图 9、图 10 所示。

从图中可以看出，对于正常线路，磁场的幅值和相位沿线路几乎未发生变化，而对于故障线路，磁场的幅值和相位在故障点处发生突变，突变点即故障点发生在电源侧 1 000 m 和 1 200 m 之间，即第 5 个传感器和第 6 个传感器之间。

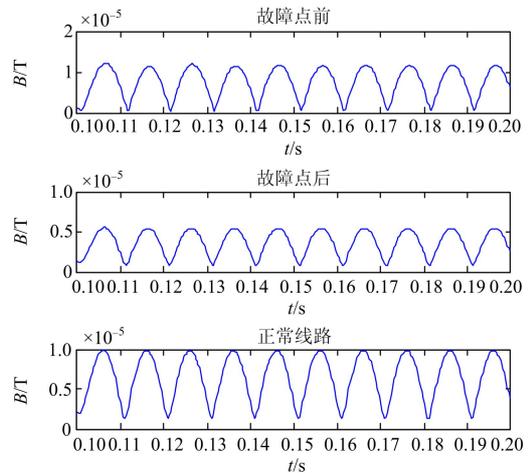


图 7 故障后磁场幅值比较

Fig. 7 Comparison of magnetic field magnitude on fault time

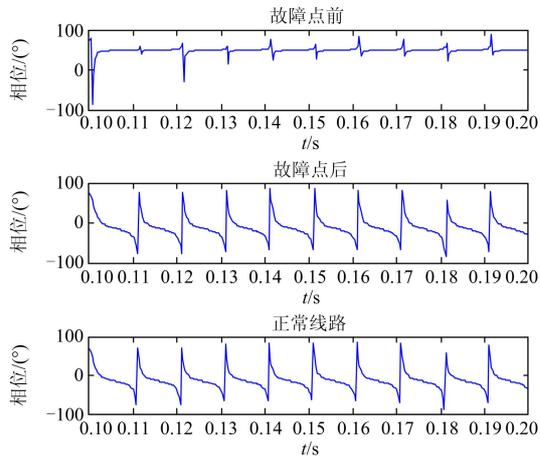


图 8 故障后磁场相位比较

Fig. 8 Comparison of magnetic phase on fault time

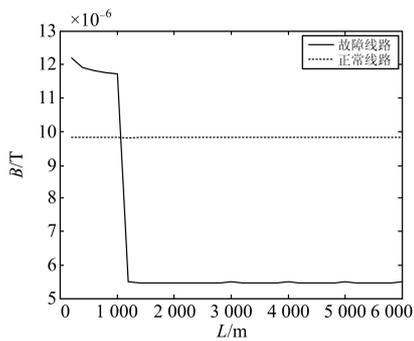


图 9 沿故障线路和正常线路磁场强度

Fig. 9 Magnetic field amplitude along fault line and normal line

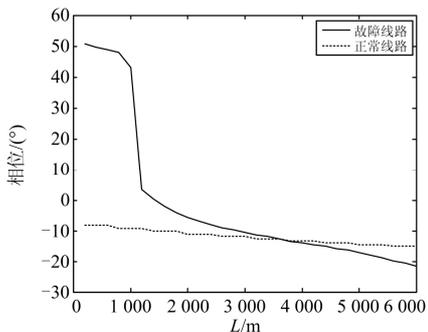


图 10 沿故障线路和正常线路相位

Fig. 10 Magnetic field amplitude along fault line and normal line

3.3 综合判据分析

虽然中性点非有效接地系统故障电流微弱, 但是通过分析和仿真结果, 磁阻传感器一般安装在杆塔正下方 3~5 m 处, 完全可以实现架空线下磁场检测、数据采集和分析。而对于不同参数的线路系统, 需要设定具体的阈值。

正常运行的线路是一个稳态系统, 在以最大电

流 I_{\max} 和最小电流 I_{\min} 运行时, 磁场强度会保持一个稳定的区间。当发生单相接地故障时, 系统经过暂态过程后又变为稳态系统, 磁场强度也趋于稳态。以本文中的仿真系统为例, 故障前后正常线路(线路 1)和故障线路(线路 2)的磁场强度和相位变化如表 1 所示。

表 1 线路下方磁场强度和相位变化

Table 1 Magnetic field and phase change below the line

	磁场强度对比/ μT		磁场相相对比/(°)	
	故障前时刻	故障后时刻	故障前时刻	故障后时刻
线路 1	呈正弦波, 幅值在 1~4 μT 之间, 峰值在 4 μT 左右	呈正弦波, 幅值在 2~10 μT 之间, 峰值在 10 μT 左右	呈类似正弦曲线变化, 幅值在 -70° ~ 70° 之间, 平稳处在 0° 左右	呈类似正弦曲线变化, 幅值在 -70° ~ 70° 之间, 平稳处在 0° 左右
线路 2	呈正弦波, 幅值在 0~2 μT 之间, 峰值在 2 μT 左右	呈正弦波, 故障点前区段幅值在 2~12 μT 之间, 峰值在 12 μT 左右; 故障点后区段幅值在 2~6 μT 之间, 峰值在 6 μT 左右	呈类似正弦曲线变化, 幅值在 -70° ~ 70° 之间, 平稳处在 0° 左右	故障点前 45° 左右, 故障点后呈类似正弦曲线变化, 幅值在 -70° ~ 70° 之间, 平稳处在 0° 左右

根据线路运行参数确定线路磁场强度阈值(本例线路 1 阈值设置为 4 μT , 线路 2 阈值设置为 2 μT); 信号采集装置实时监测各杆塔下方磁场强度及相位变化, 当超过阈值时进行数据整合分析, 沿线路进行比幅比相, 找到幅值和相位突变点, 故障点即定位在该磁场突变点所在传感器与前一个传感器所对应的杆塔之间。利用磁场强度和相位双判据大大提高了算法的可靠性。本例判据仿真结果如图 9、图 10 所示, 可以直观显示磁场强度及相位突变点从而准确定位故障点于第 5 与第 6 杆塔之间。

考虑到空间磁场易受干扰, 本文故障点的定位是基于全线路传感器的采样值进行分析判断的。假设线路上某点发生故障, 此故障点前所有传感器检测出的磁场的幅值和相位基本相同, 此故障点后所有传感器检测出的磁场的幅值和相位也基本相同。由于算法采用的数据量不是单一个体, 所以即便其中某一个传感器周围的磁场受到干扰而产生坏数据, 对整体样本并不能造成影响, 不会降低此算法的可靠性。

4 应用方案

在沿线杆塔上安装磁阻传感器, 安装示意图如

图 11 所示。传感器由太阳能电池板供电。传感器数据通过远程监控终端采集并传输到客户端。当发生接地故障时，根据客户端显示的传感器状态，结合地理信息系统(GIS)可实现故障位置的准确定位。应用方案主要由电源、CPU、传感器模块、数据采集模块、存储模块、通信模块、信号处理模块组成。总体方案如图 12 所示。

本方案基于对磁场的非接触式测量进行故障选线及故障定位，其中磁阻传感器安装在杆塔上从而避免直接在高压线上安装电压互感器和电流互感器。磁阻传感器测量精度高、体积小、成本低，故障距离可以确定在两个杆塔之间，安装维护时不需要停电，提高了工作人员的安全性。

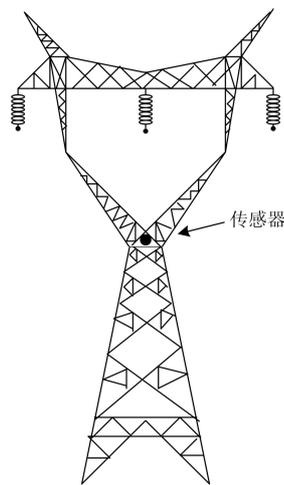


图 11 在输电杆塔安装磁阻传感器的示意图

Fig. 11 Demonstration of installing the magnetic sensor on the transmission tower

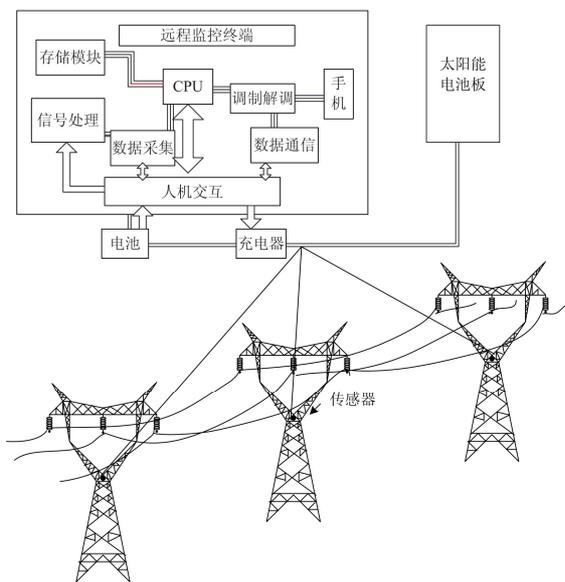


图 12 总体方案

Fig. 12 Overall scheme

5 总结

(1) 架空线下磁场能完全反映线路中电流的变化，当线路发生单相接地故障时，三相稳态电流发生变化，磁场也随之发生改变。分析了单相接地后故障线路和正常线路及故障线路故障点前后线路的电流分布，探讨了正常线路和故障线路在故障前后磁场稳态分布。

(2) 利用磁阻传感器的沿线路输出量、磁场强度和相位的变化判断出线路及定位故障点。通过建立配电网水平分布的架空线电磁场模型，运用 Matlab 进行了仿真，仿真验证了理论的可行性。

参考文献

[1] 刘健, 倪建立, 邓永辉. 配电自动化系统[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

[2] 查丛梅, 王长江, 魏云冰, 等. 一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 100-104.

ZHA Congmei, WANG Changjiang, WEI Yunbing, et al. A new method of the resonant grounding system fault line detection based on EMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 100-104.

[3] 陈志亮, 范春菊. 基于 5 次谐波突变量的微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, 69.

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-EPSCA, 2006, 18(5): 37-41, 69.

[4] 司瑞琦, 黄翰, 罗建, 等. 基于消弧线圈补偿特征的故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 16-22.

SI Ruiqi, HUANG Han, LUO Jian, et al. Fault line selection approach based on compensation characteristics of extinction coil[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 16-22.

[5] 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.

[6] 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.
- [7] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.
- GAO Zhipeng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.
- [8] 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 new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [9] 牛云涛, 李华, 宋志宏, 等. 谐振接地系统多判据多周期信息融合故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 512-517.
- NIU Yuntao, LI Hua, SONG Zhihong, et al. Fault line selection for grounding power network in arc suppression coil based on information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 512-517.
- [10] 束洪春, 高峰, 葛耀中, 等. 辐射状馈线故障测距的测后模拟法[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 50-54.
- SHU Hongchun, GAO Feng, GE Yaozhong, et al. Simulation after test method for fault location of radial feeder[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 50-54.
- [11] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.
- QIN Jian. Study on single terminal travelling wave fault location of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 65-70.
- [12] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 25-29.
- WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 25-29.
- [13] QI Huang, WEI Zhen, PONG P W T. A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1186-1195.
- [14] 陈玥云, 覃剑, 王欣, 等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 89-93.
- CHEN Yueyun, QIN Jian, WANG Xin, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 89-93.
- [15] 许杨. 高压输电线路工频电磁效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- XU Yang. An investigation on power frequency electromagnetic effect of high voltage transmission lines[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [16] 李孟秋, 王耀南, 王辉, 等. 小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 7-10, 24.
- LI Mengqiu, WANG Yaonan, WANG Hui, et al. A new approach on detecting the single-to-ground fault location on power system with neutral unearthed[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 7-10, 24.

收稿日期: 2015-07-12; 修回日期: 2015-11-21

作者简介:

田书(1963-), 女, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护及配电网故障选线等方面的研究; E-mail: tianshu@hpu.edu.cn

王亚彩(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障选线及故障定位; E-mail: 15138070602@163.com

王晓卫(1983-), 男, 硕士, 中国电机工程学会会员, 助理工程师, 研究方向为新型继电保护和故障测距的原理与技术。E-mail: proceedings@126.com

(编辑 魏小丽)