

# 基于主频零序功率的配电网故障选线新方法

杨新伟, 郭彩霞

(河南师范大学 电子与电气工程学院, 河南 新乡 453007)

**摘要:**在复杂的小电流接地系统发生单相接地故障时, 现有的利用相关性选线的方法有时因判据裕度不足而产生误判. 针对裕度不足的问题, 本文提出了基于主频零序功率的配电网故障选线方法, 其以主频零序功率作为特征量来选线, 计算出各馈线所对应的主频零序功率综合相关系数, 其中故障线路综合相关系数小于零, 而健全线路综合相关系数大于零. 大量仿真结果表明, 此方法在一定程度上提高了选线判据裕度和选线准确率, 且不受合闸角和故障电阻的影响.

**关键词:**小电流接地系统; 单相接地故障; 主频零序功率; 综合相关系数

**中图分类号:** TM771

**文献标志码:** A

配电网结构复杂, 现有的故障选线方法还是有所限制. 如注入信号法<sup>[1-2]</sup>, 可利用信号检测装置判断故障线路, 但需要装设信号注入设备, 投资比较大, 且受间歇性电弧和故障电阻的影响; 零序导纳法<sup>[3-4]</sup>利用每条线路故障前后导纳系数的变化进行故障选线, 但它需要消弧线圈一起配合使用, 适用范围有限; 首半波法<sup>[5]</sup>利用故障线路与健全线路的首次波头极性相反的原理选线, 但对采集设备要求过高; 零序电流相关分析法<sup>[6]</sup>可利用故障线路零序电流综合相关性小而健全线路综合相关性大的原理进行选线, 但判据裕度有时过低, 容易引起误判. 文献[7-8]提出的基于小波包分析选线定位方法由于存在小波基函数选取的问题, 因此有待改进. 零序功率相关分析法<sup>[9]</sup>利用故障区段与非故障波形方向相反的原理在选线定位方法已应用的比较多, 由于零序功率相对零序电流引入了零序功率信号, 在实际运用中会避免在运用零序电流信号作为特征量选线时信号微弱产生误判问题, 但此方法利用全频带信息时会在一定程度上掩盖一部分故障特征频带信息, 容易造成故障判据较小的情况.

因此本文利用 prony 算法提出的基于主频零序功率的配电网故障选线新方法, 利用故障线路主频零序功率极性与健全线路极性相反, 进而可通过主频零序功率综合相关系数来选线, 此方法与仅利用零序功率选线法相比在很大程度上提高了故障判据裕度和选线准确率, 更适用于结构复杂的配电网系统.

## 1 主频分量的提取

prony 算法现在在主频分量的提取上运用的很成熟, 它是通过一系列的振幅、频率、相位、衰减因子的复指数函数的线性拟合的算法<sup>[10]</sup>. 假设有  $k$  个暂态输入量  $y(0), y(0), \dots, y(k-1)$ , 则利用  $m$  个指数函数来拟合输入量的表达式如下:

$$b_s = A_s e^{j\theta_s}, \quad (1)$$

$$z_s = e^{(\alpha_s + j2\pi f_s) \Delta t}, \quad (2)$$

$$\hat{y}(i) = \sum_{s=1}^m b_s z_s^i, \quad (3)$$

式中  $A_s$  为振幅,  $\theta_s$  为初相角,  $\alpha_s$  为衰减因子,  $f_s$  为频率,  $\Delta t$  为时间间隔. 通过文献[11-12]中的步骤可求出  $m$

收稿日期:2016-04-28; 修回日期:2016-07-06.

基金项目:国家自然科学基金(61273120)

第1作者简介(通信作者):杨新伟(1982-), 男, 河南新乡人, 河南师范大学讲师, 主要从事电气自动化方面的研究,

E-mail: yangxw@htu. cn.

组的振幅、频率、相位、衰减因子. 把  $m$  组数据分别代入式(1)~(3)中, 可得到  $m$  个分量. 本文定义利用  $m$  组中幅值最大所对应的那一组数据算得的分量为主频分量, 所对应的频率叫作主频率. 本文需提取主频零序功率, 因此可通过对零序电流和零序电压信号进行 prony 算法拟合, 提取相应的主频零序电流和主频零序电压来求取主频零序功率

$$P_{0z}(n) = u_{0z}(n)i_{0z}(n), n = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

其中,  $i_{0z}$ ,  $u_{0z}$ ,  $P_{0z}$  分别表示主频零序电流、主频零序电压和主频零序功率.

## 2 选线原理

通过文献[13]可知健全线路的主频零序电流超前母线主频零序电压  $90^\circ$ , 故障线路的主频零序电流滞后母线主频零序电压  $90^\circ$ , 因此可知健全线路的主频零序功率的相位与故障线路的主频零序功率是相差  $180^\circ$ , 那么可知健全线路的主频零序功率与故障线路的主频零序功率之间的相关系数为负, 而每两条健全线路的主频零序功率之间的相关系数为正, 因此可利用综合相关系数作为判据来选线.

一般相关系数是用来形容两个信号的相似程度<sup>[14]</sup>. 那么任意两条馈线所对应的主频零序功率之间的相关系数

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N P_{0zx}(n)P_{0zy}(n)}{\left(\sum_{n=1}^N P_{0zx}^2(n)\sum_{n=1}^N P_{0zy}^2(n)\right)^{-\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

式中,  $P_{0zx}$ ,  $P_{0zy}$  分别表示馈线  $x, y$  所对应的主频零序功率.  $n = 1$  表示故障发生时刻,  $N$  为信号数据长度. 由于零序电流互感器在故障发生  $1/4$  个周期以后容易饱和<sup>[15]</sup>, 因此本文只选取故障发生后  $1/10$  周期内的数据进行相关性分析, 这样也减少了运算数据, 提高了选线效率.

通过公式(5)可求得各馈线主频零序功率之间的两两相关系数, 那么可得到相关系数矩阵

$$B = (\rho_{ij})_{l \times l},$$

其中,  $\rho_{ij}$  表示第  $i$  条馈线与第  $j$  条馈线主频零序功率之间的相关系数,  $l$  表示馈线的总个数. 定义第  $i$  的综合相关系数为第  $i$  条馈线与其他馈线之间的相关系数的平均数, 即第  $i$  行元素的平均数, 每条线路所对应的综合相关系数

$$\rho_i = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \rho_{ij}. \quad (6)$$

配电网线路中发生单相接地故障时, 综合相关系数小于零的馈线为故障线路, 若都大于零则是母线故障. 具体选线步骤如下:

- 1) 实时检测零序电流是否大于 0.15 倍的系统额定相电压最大值, 如若是则进行 2);
- 2) 利用 prony 算法提取母线主频零序电压和各馈线主频零序电流;
- 3) 通过主频零序电压分别与各馈线主频零序电流相乘来计算各馈线所对应的主频零序功率;
- 4) 利用公式(5)计算各馈线主频零序功率之间的两两相关系数, 得到矩阵  $B$ ;
- 5) 利用公式(6)计算各馈线主频零序功率综合相关系数;
- 6) 小于零的综合相关系数所对应的馈线为故障线路; 若综合相关系数都大于零则是母线故障.

## 3 算例分析

### 3.1 仿真模型

利用 EMTP 搭建了 110 kV/10 kV 的配电网经消弧线圈接地模型如图 1 所示, 其中架空线路与电缆线路参数引用于参考文献<sup>[16]</sup>; 本文每条馈线都接有负荷, 用一个  $(400 + j20)\Omega$  的阻抗代替; 消弧线圈采用过补偿方式运行, 补偿度为 8%, 消弧线圈电感值为 0.982 H; 采样频率为 100 kHz, 仿真时间设为 0.04 s, 发生单相接地故障时刻为 0.02 s.

### 3.2 仿真结果分析

对单相接地故障分别发生在线路 1 的 10% 和 90%、合闸角  $0$  和  $90^\circ$  时的结果进行分析验证. 由于篇幅限

制,只分别给出单相接地故障发生在线路 1 的 10%处合闸角 0、故障电阻为 5 Ω 和合闸角 0、故障电阻 5000 Ω 时从各线路处提取到的主频零序电流和从母线处提取到主频零序电压如表 1 所示,母线的主频零序电压与各线路的主频零序电流的乘积即为各线路的主频零序功率如图 2、3 所示.通过图 2 和图 3 可知健全线路 2、3、4 的主频零序功率分别与故障线路 1 的主频零序功率的方向是相反的,而健全线路 2、3、4 的主频零序功率方向是相同,因此可知此方法应用在本仿真模型上的效果很好.

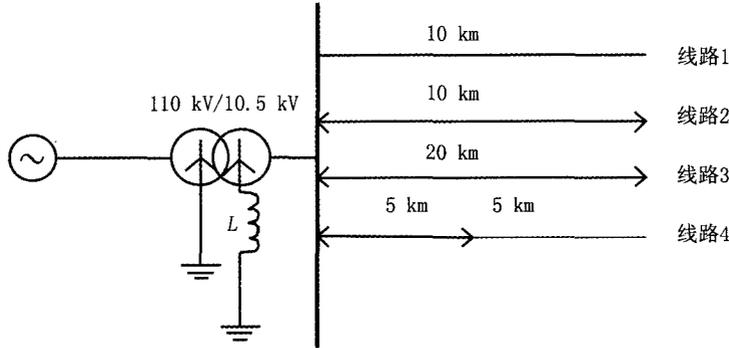


图1 仿真模型

表 1 主频分量参数

| 电阻/<br>Ω | 被测<br>物理量 | 线路<br>类型 | 频率/Hz | 幅值     | 相位/<br>(°) | 衰减<br>因子 | 电阻/<br>Ω | 被测<br>物理量 | 线路<br>类型 | 频率/<br>Hz | 幅值     | 相位/<br>(°) | 衰减<br>因子 |
|----------|-----------|----------|-------|--------|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|--------|------------|----------|
| 5        | $i_{0z}$  | 1        | 858   | 124 A  | 87         | -67      | 5000     | $i_{0z}$  | 1        | 857       | 128 A  | 90         | -71      |
|          |           | 2        | 858   | 56 A   | -93        | -68      |          |           | 2        | 857       | 58 A   | -90        | -72      |
|          |           | 3        | 858   | 4 A    | -95        | -62      |          |           | 3        | 857       | 5 A    | -84        | -86      |
|          |           | 4        | 858   | 63 A   | -94        | -65      |          |           | 4        | 857       | 7 A    | -90        | -70      |
|          | $u_{0z}$  | 母线       | 858   | 4418 V | 175        | -60      |          | $u_{0z}$  | 母线       | 857       | 5241 V | 179        | -83      |

为了更进一步验证此方法的可行性,本文列出了相应的仿真条件所得到的每条馈线的综合相关系数如表 2 所示,此方法记为方法一.为了比较本文提出的主频零序功率作为特征量的优势,本文也做了以传统的零序功率作为特征量来选线,此方法记为方法二,结果如表 3 所示.

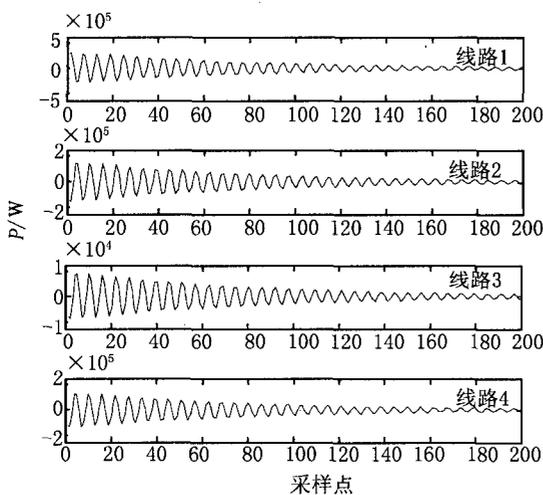


图2 合闸角0°、故障电阻5 Ω时各线路主频零序功率

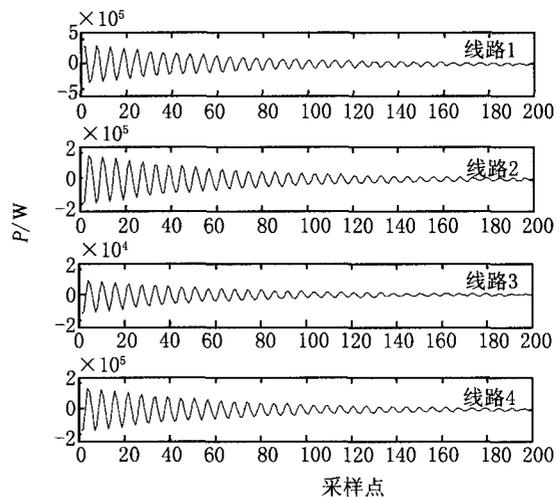


图3 合闸角0°、故障电阻5000 Ω时各线路主频零序功率

通过表 2 可知,运用主频率零序功率选线效果很好,健全线路主频率零序功率所对应的综合相关系数很大,均接近于 0.5,而故障线路主频率零序功率所对应的综合相关系数很小,接近于-0.5,可知以 0 为判断边界的情况下其判据裕度很大,且不受故障电阻、故障位置、合闸角的影响,因此不存在误判的现象.通过表 3 可知,若仅仅利用传统的零序功率作为特征量来分析其综合相关性,其判据裕度不够大,若外界有扰动干

扰,则很容易发生误判现象.

表2 利用主频零序功率综合相关系数选线结果

| 线路故障率/% | 合闸角/(°) | 电阻/ $\Omega$ | $\rho_1$ | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\rho_4$ |
|---------|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 0       | 0       | 5            | -0.4992  | 0.4995   | 0.5001   | 0.5000   |
|         |         | 500          | -0.4991  | 0.4993   | 0.4993   | 0.4990   |
|         |         | 5000         | -0.4977  | 0.4977   | 0.4977   | 0.4977   |
| 10      | 90      | 5            | -0.4984  | 0.4994   | 0.5004   | 0.5003   |
|         |         | 500          | -0.4987  | 0.4988   | 0.4985   | 0.4984   |
|         |         | 5000         | -0.4966  | 0.4962   | 0.4963   | 0.4967   |
| 90      | 0       | 5            | -0.5000  | 0.5000   | 0.5000   | 0.4999   |
|         |         | 500          | -0.4999  | 0.4999   | 0.5000   | 0.5000   |
|         |         | 5000         | -0.4999  | 0.5000   | 0.5000   | 0.5000   |
| 90      | 90      | 5            | -0.5000  | 0.5000   | 0.5000   | 0.4999   |
|         |         | 500          | -0.4991  | 0.4993   | 0.4992   | 0.4995   |
|         |         | 5000         | -0.4965  | 0.4968   | 0.4978   | 0.4949   |

表3 利用传统零序功率综合相关系数选线结果

| 线路故障率/% | 合闸角/(°) | 电阻/ $\Omega$ | $\rho_1$ | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\rho_4$ |
|---------|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 0       | 0       | 5            | -0.2781  | 0.2408   | 0.2622   | 0.2253   |
|         |         | 500          | -0.2782  | 0.2359   | 0.2662   | 0.2280   |
|         |         | 5000         | -0.2854  | 0.2421   | 0.2699   | 0.2355   |
| 10      | 90      | 5            | -0.2055  | 0.2690   | 0.2744   | 0.2567   |
|         |         | 500          | -0.2838  | 0.2595   | 0.2844   | 0.2551   |
|         |         | 5000         | -0.2611  | 0.2657   | 0.2813   | 0.2505   |
| 90      | 0       | 5            | -0.4320  | 0.4199   | 0.4195   | 0.4208   |
|         |         | 500          | -0.4258  | 0.4129   | 0.4119   | 0.4151   |
|         |         | 5000         | -0.4125  | 0.4007   | 0.3980   | 0.3990   |
| 90      | 90      | 5            | -0.1620  | 0.5141   | 0.4979   | 0.5208   |
|         |         | 500          | -0.3046  | 0.3976   | 0.3815   | 0.3931   |
|         |         | 5000         | -0.1929  | 0.4169   | 0.3724   | 0.4038   |

### 3.2 母线故障分析

为了检验本方法对母线故障的适用性,本文做了母线在合闸角为0时发生了过渡电阻为5  $\Omega$ 、50  $\Omega$ 、500  $\Omega$ 、5000  $\Omega$ 的4种单相接地情况,得到的各馈线主频零序功率的综合相关系数如表4所示.

仿真结果表明,各线路综合相关系数均大于0,通过本文选线原理可知均是母线发生了故障,因此本文提出的基于主频零序功率的配电网选线新方法适应于母线故障判别,判据裕度比较大,不易发生误判.

表4 母线故障时各馈线主频零序功率的综合相关系数

| 故障电阻/ $\Omega$ | $\rho_1$ | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\rho_4$ |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| 5              | 0.5747   | 0.5002   | 0.3391   | 0.5013   |
| 50             | 0.8091   | 0.8216   | 0.5457   | 0.6248   |
| 500            | 0.7603   | 0.4413   | 0.5918   | 0.6886   |
| 5000           | 0.5076   | 0.1678   | 0.5175   | 0.1364   |

## 4 结论

本文提出了以含有大量故障特征信息的主频零序功率作为故障特征量进行选线.当线路发生故障时故障线路综合相关系数小于0,而健全线路综合相关系数大于0;当母线发生故障时各线路综合相关系数均大于0.本文利用此原理选线发现与传统的利用零序电流或零序功率的方法相比,其判据裕度较大,不易受外

界干扰而出现误判的现象,能有效判别出故障馈线,且不受故障电阻、故障合闸角、故障位置的影响,更能适应结构复杂的配电网系统.

### 参 考 文 献

- [1] 曾祥君,尹项根,于永源,等.基于注入变频信号法的经消弧线接地系统控制与保护新方法[J].中国电机工程学报,2000,20(1):29-32.
- [2] 张慧芬.配电网单相接地故障检测技术研究[D].济南:山东大学,2006.
- [3] 曾祥君,尹项根,张 哲,等.零序导纳法馈线接地保护的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(4):5-10.
- [4] 林湘宁,高 艳,刘 沛,等.基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J].中国电机工程学报,2006,26(10):45-49.
- [5] 龚 静,李英姿,王亚慧.基于DSP的小电流接地系统暂态首半波法实现[J].电工技术,2006(9):34-36.
- [6] 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):6-10.
- [7] 彭姗霞,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.
- [8] PERERA N, RAJAPAKSE A D, BUCHHOLZER T E. Isolation of Faults in Distribution Networks With Distributed Generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008,23(4):2347-2355.
- [9] 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.
- [10] 丁屹峰,程浩忠,吕干云,等.基于Prony算法的谐波和间谐波频谱估计[J].电工技术学报,2005,20(10):94-97.
- [11] 黄云江,谢维波.基于迭代Prony算法的高精度谐波检测[J].电气应用,2007,26(4):96-100.
- [12] 刘应梅,高玉洁.基于Prony法的暂态扰动信号分析[J].电网技术,2006,30(4):26-30.
- [13] 张新慧,潘馨雨,何柏娜,等.基于暂态主频零模电流的故障选线仿真研究[J].计算机仿真,2013,30(10):157-162.
- [14] 胡广书.数字信号处理:理论与算法与实现[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [15] 郑 晨,王晓卫,刘雅娟,等.基于经验模态分解差分谱的故障选线新方法[J].工矿自动化,2013,39(2):75-79.
- [16] 康小宁,刘 鑫,索南加乐,等.基于矩阵束算法的经消弧线接地系统故障选线新方法[J].电力系统自动化,2012,36(12):88-93.

## A New Method of Fault Line Selection for Distribution Network Based on Zero Sequence Power of the Main Frequency

YANG Xinwei, GUO Caixia

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** In the complex small current grounding system, when single phase earth fault occurred, the existing line selection methods of using the correlations maybe have problems because of insufficient criterion margin. For the lack of margin, this paper proposes a new method of fault line selection for distribution network based on the characteristic of zero-sequence power with main frequency. Then, we calculate the integrated correlation coefficient of zero sequence power with main frequency on every line. The integrated correlation coefficient of the fault line is less than zero, and the integrated correlation coefficient of the sound line is more than zero. The simulations show that the new method can improve the selection criterion margin and the accuracy of line selection, and it is not affected by the closed angle and fault resistance.

**Keywords:** small current grounding system; single phase earth fault; zero sequence power with main frequency; integrated correlation coefficient