

文章编号:1671-251X(2015)11-0081-04 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.11.020
马春艳,龚瑛.煤矿谐振接地故障模糊综合选线方法[J].工矿自动化,2015,41(11):81-84.

煤矿谐振接地故障模糊综合选线方法

马春艳^{1,2}, 龚瑛³

(1. 武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 湖北汽车工业学院 电气信息工程学院, 湖北 十堰 442002; 3. 广东电网 佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要:针对谐振接地系统中依据稳态分量的故障选线方法失效的问题,从暂态分量角度甄选了零序能量法、小波变换法和增强小波包法进行分析。引入模糊综合选线方法对3种方法进行集成,并运用层次分析法确定3种方法的权重。仿真分析结果表明,零序能量法和增强小波包法的可靠性较好,而小波变换法出现了误判,可靠性较差;模糊综合选线方法没有受到其他错误信号的干扰,给出了正确结论,具有较强的可靠性。

关键词:谐振接地系统; 模糊综合选线方法; 故障选线; 暂态分量; 层次分析法

中图分类号:TD608 文献标志码:A 网络出版时间:2015-11-02 15:00

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151102.1500.020.html>

Fuzzy comprehensive line selection method of resonance grounding fault in coal mine

MA Chunyan^{1,2}, GONG Ying³

(1. College of Information Science and Engineering, University of Wuhan Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, University of Hubei Automotive Technology, Shiyan 442002, China; 3. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Foshan 528000, China)

Abstract: For failure of fault line selection methods based on steady-state component in resonance grounding system, three kinds of methods were analyzed from the perspective of transient component including zero-sequence energy method, wavelet transform method and enhancing wavelet packet method. Fuzzy comprehensive evaluation method was introduced to integrate the three kinds of methods, and AHP method was used to determine weights of the three methods. The simulation conclusion shows that the reliability of zero-sequence energy method and enhancing wavelet packet method are better, but wavelet transform methods has false conclusion, with poor reliability; The fuzzy comprehensive evaluation is not interfered by other error signal, and gives correct conclusion, which has strong reliability.

Key words: resonance grounding system; fuzzy comprehensive evaluation method; fault line selection; steady-state component; AHP

0 引言

我国煤矿井下电气设备安全隐患多,发生故障的概率大,其中单相接地故障约占故障总量的80%^[1]。如果单相接地故障扩大至多点接地故障,

会引发瓦斯爆炸等灾难性事故^[2]。由于小电流接地系统单相接地故障时接地残流小,使得故障选线难度较大。尤其是谐振接地时,故障元件与非故障元件的区分更为困难^[3]。目前,故障选线方法主要包括群体比较幅值和相位法、零序无功功率方向法、零

收稿日期:2015-08-12;修回日期:2015-09-16;责任编辑:胡娴。

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(B2015122)。

作者简介:马春艳(1980—),女,吉林长春人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护及其自动化,E-mail:mcysjy@126.com。通信

作者:龚瑛(1981—),女,湖北随州人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护及其自动化,E-mail:gongying1@126.com。

序电流有功功率法、相间工频变化量比较法、DESIR 法、模式识别法、零序导纳法、零序能量法、谐波法、小波变换法、零序电流幅值比较法、增强小波包法以及首半波法等^[4-8]。近年来又出现了时频谱相似度识别法^[9]、时频原子灰色关联法^[10]、零序电流全量 Hough 变换法^[11]、Prony 相对熵法^[12]、EMD 及 Duffing 振子法^[13]等选线方法。但是,这些方法并非都适用于谐振接地系统,如采用零序电流比幅法进行故障选线时,消弧线圈具有补偿故障接地电容电流的作用,使得零序电流减小,应用效果受到极大影响^[14]。

谐振接地电网发生单相接地故障时,消弧线圈可以补偿电网的接地电容电流,提高供电可靠性,但会导致依靠稳态分量来确定故障线路的方法失效^[15]。因为接地电流暂态分量中暂态电容电流和暂态电感电流的频率和幅值差别显著,不能相互补偿,所以,暂态分量具有比稳态分量更为明显的故障特征^[16]。因此,谐振接地系统应该采用基于暂态分量的故障选线方法^[17]。本文在分析多种故障选线方法的基础上,遴选 3 种方法进行分析,即零序能量法、小波变换法和增强小波包法。考虑到谐振接地系统故障选线的模糊性^[18],运用模糊综合选线方法对 3 种方法进行集成,最后通过仿真分析验证了集成方法的可靠性。

1 基于暂态分量的故障选线方法

1.1 零序能量法的故障特征量及其隶属函数的确定

零序能量函数定义为线路的零序电压与零序电流乘积的积分:

$$E_0(t) = \int_0^t u_0(\varphi) i_0(\varphi) d\varphi \quad (1)$$

式中: E_0 为零序能量函数; u_0 为零序电压; i_0 为零序电流; φ 为时间变量; t 为短路切除时间。

将能量函数大小的绝对值作为故障特征量 e , 则其隶属度函数为

$$r(e) = \begin{cases} 1 & e < 0.05 \\ 10/9(1-2e) & 0.05 \leq e \leq 0.5 \\ 0 & e > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 小波变换法的故障特征量及其隶属函数的确定

由于暂态过程时间较短,信号采集时可能会存在干扰,比幅比相法稳定性不足。本文采用相关分析原理,将小波参数值相似系数作为选线判据。利

用小波对暂态零序电流进行分析后,根据互相关运算公式,对小波信号故障时刻波形进行两两相关分析,求取线路之间的相关系数 β_{ij} ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n; n$ 为系统馈线支路条数),形成相关系数矩阵 β :

$$\beta = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & 1 & \cdots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据相关系数矩阵求取每条线路相对于其他线路的综合相关系数 β_i , 定义

$$\beta_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_{ij} \quad (4)$$

根据式(4),比较各条线路的综合相关系数,最小综合相关系数对应的线路即为故障线路。若最大综合相关系数与最小综合相关系数之差小于阈值 β_0 , 则判断系统发生母线故障。因此,隶属度函数为

$$r(\beta_i) = \begin{cases} \frac{\beta_{\max} - \beta_i}{\beta_{\max} - \beta_{\min}} & \beta_{\min} \leq \beta_i < \beta_{\max} \\ 0 & \beta_i \geq \beta_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\beta_{\max}$, $\beta_{\min}$ 分别为综合相关系数最大值和最小值。

1.3 增强小波包法的故障特征量及其隶属函数的确定

利用小波包对增强后的信号进行分解,然后计算线路在各自能量较集中的频段的总能量 E_{sum} , 设

$$E_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n E(i).$$

根据线路零序电流小波包分解结果的极性及其他多数线路的分解结果,线路 i 的能量 $E(i)$ 在总能量中所占的比例 $p(i)$ 越大,则其是故障线路的可能性越小。定义 $p(i) = E(i) / \sum_{i=1}^n E(i)$, 则其隶属度函数为

$$r(p) = \begin{cases} 0 & p \leq 1/5m \\ 5(2-mp)/9 & 1/5m < p < 2/m \\ 1 & p \geq 2/m \end{cases} \quad (6)$$

式中: p 为线路能量在总能量中所占的比例; m 为尺度(分辨率)的模值。

2 层次分析法基本原理

运用层次分析法确定采用零序能量法、小波变换法和增强小波包法所得的选线结果在最终综合评估值中的权重^[19]。主要步骤如下:

(1) 构建判断矩阵。假设要比较 n 个因子 $y =$

$\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 对目标的影响, 每次取 2 个因子 y_i 和 $y_j (i, j=1, 2, \dots, 6)$, 设 $a_{ij} = y_i/y_j$, 用数字 1—9 及其倒数作为标度。全部比较结果用成对比较判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 表示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(2) 计算最大特征根。判断矩阵 A 的元素应当满足: $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \forall i, j, k=1, 2, \dots, n$ 。但是实际上该条件很难满足, 因此, 首先计算矩阵 A 的权重向量 W 。求 W 一般有 2 种方法, 即精确计算幂法和近似计算几何平均法。在求得 W 后, 根据 $AW=\lambda_{\max}W$ 就可以得到最大特征根 $\lambda_{\max}$ 。

(3) 一致性检验。首先计算一致性指标: $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 然后查找相应的平均随机一致性指标 RI , 并计算一致性比例 $CR=CI/RI$ 。当 $CR<0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正。

3 模糊综合选线方法基本原理

模糊综合评价包括 2 个层次, 即准则层的评价和目标层的评价^[20]。首先进行准则层的评价, 然后再进行目标层的综合评价。

准则层的模糊综合评价可以表示为

$$B_i = w_i \circ R_i = [b_{i1} \quad b_{i2} \quad \cdots \quad b_{in}] \quad (8)$$

式中: B_i 是指准则层第 i 个元素的模糊综合评价结果; w_i 表示权重矩阵; $\circ$ 表示广义的模糊合成运算; R_i 表示隶属度矩阵; b_m 表示 B_i 的一个元素。

确定目标评价对象的模糊评价矩阵:

$$B = W \circ \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^n \end{bmatrix} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_n] \circ \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 & \cdots & b_N^1 \\ b_1^2 & b_2^2 & \cdots & b_N^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_1^n & b_2^n & \cdots & b_N^n \end{bmatrix} = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_N] \quad (9)$$

式中: B^n 为准则层的第 n 个元素的模糊综合评价结果; ω_n 表示准则层的第 n 个元素的权重; b_N^n 表示 B^n 的第 N 个元素。

依据隶属度最大原则, $b_i = \max_{1 \leq k \leq N} (b_k)$ 就是最终评价结果。

4 实例分析

4.1 系统模型搭建

用 Matlab/Simulink 建立 10 kV 配电系统仿真模型, 如图 1 所示。

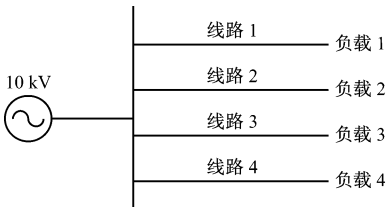


图 1 10 kV 配电系统仿真模型

该系统包含 1 条进线和 4 条出线, 谐振接地, 数据采集频率为 10 kHz, 馈线分别为 25, 35, 45, 65 km。系统主要参数: 零序电抗 L_0 : 3.84 mH/km; 零序电纳 C_0 : 26 μ F/km; 零序电阻 R_0 : 0.59 Ω /km; 正序电抗 L_1 : 0.94 mH/km; 正序电纳 C_1 : 59.6 μ F/km; 正序电阻 R_1 : 0.52 Ω /km; 线圈电感 L_N : 0.57 H; 线圈电阻 R_N : 19 Ω 。

4.2 权重计算

权重计算步骤:

(1) 构建判断矩阵。邀请专家对小波变换法、零序能量法以及增强小波包法的相对重要性进行主观判断, 并采用 1—9 及其倒数作为标度, 得到判断矩阵, 以表格形式表示, 见表 1。权重计算数值依次为 0.534 6, 0.763 1, 0.702 3。

表 1 判断矩阵

指标	小波变换法	零序能量法	增强小波包法
小波变换法	1	3	1/6
零序能量法	1/4	1	2
增强小波包法	5	1/3	1

(2) 采用几何平均法计算最大特征根 $\lambda_{\max}$, 得到 $\lambda_{\max}=3.104\ 44$ 。

(3) 一致性检验。为了使判断矩阵具有可靠性, 需要进行一致性检验。计算 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.104\ 44 - 3}{2} = 0.052\ 217$; 再计算 $CR = CI/RI = 0.052\ 217/0.58 = 0.090\ 03 < 0.10$, 因此, 可以认为判断矩阵具有满意的一致性, 可以采用。

4.3 模糊综合选线

对不同线路(母线、线路 1、线路 2、线路 3 和线路 4)采集故障样本, 并代入式(2)、式(5)和式(6), 得到隶属度矩阵为

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} 0.736 & 2 & 0.643 & 5 & 0.156 & 9 & 0.462 & 7 & 0.765 & 4 \\ 0.635 & 4 & 0.341 & 9 & 0.302 & 4 & 0.346 & 2 & 0.431 & 2 \\ 0.846 & 2 & 0.203 & 1 & 0.521 & 8 & 0.435 & 2 & 0.621 & 4 \end{bmatrix}$$

进一步可以得到模糊综合评价结果为

$$\hat{B} = \hat{W}\hat{R} = \begin{bmatrix} 0.534 & 6 \\ 0.763 & 1 \\ 0.702 & 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.301 & 2 & 0.423 & 2 & 0.224 & 1 & 0.376 & 1 & 0.413 & 2 \\ 0.236 & 4 & 0.470 & 2 & 0.390 & 7 & 0.265 & 1 & 0.423 & 7 \\ 0.462 & 4 & 0.106 & 6 & 0.385 & 2 & 0.358 & 8 & 0.163 & 1 \end{bmatrix} = [1.472 & 7, 0.747 & 6, 0.681 & 1, 0.817 & 2, 1.174 & 6]$$

由隶属度最大原则可知,故障出现在母线上,这即为模糊综合选线方法的最终判断结果。

4.4 故障选线方法比较

将以上 4 种故障选线方法进行综合比较,结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,模糊综合选线方法、零序能量法和增强小波包法实现了正确选线,判断母线出现故障;而小波变换法则出现了误判,将线路 4 判定为故障线路。另外,零序能量法、增强小波包法和小波变换法的故障特征量变化比较均匀,稳定性较高。模糊综合选线方法并没有受到小波变换法错误结论的干扰,仍然得到了正确的结论。

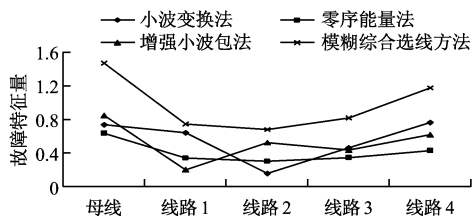


图 2 故障选线方法比较

5 结语

根据煤矿电力系统谐振接地故障的特点,甄选了零序能量法、增强小波包法和小波变换法进行分析,并运用模糊综合选线方法将 3 种方法进行集成。实例分析结果表明,零序能量法和增强小波包法的可靠性较好,而小波变换法出现了误判;尽管小波变换法给出了错误结论,但并没强烈干扰到模糊综合选线方法,显示了模糊综合选线方法较强的可靠性。

参考文献:

[1] 高鹏,莫兴洋,徐晋勇,等.煤矿井下中性点不接地单相漏电故障选线方法[J].煤矿安全,2015,46(1):85-88.
[2] 程庆生.煤矿井下电网的漏电故障选线研究[J].电工技术,2009(12):60-61.

[3] 唐轶,陈庆,陈奎.单相接地故障暂态电流方向选线研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(2):201-206.
[4] 王晓卫,高杰,魏向向,等.基于小波包-贝叶斯的小电流接地系统故障选线方法[J].工矿自动化,2014,40(6):54-59.
[5] 康小宁,刘鑫,索南加乐,等.基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法[J].电力系统自动化,2012,36(12):88-93.
[6] 何金朋,田书,杨新平.基于多源信息融合的小电流接地系统故障选线方法研究[J].工矿自动化,2013,39(3):56-60.
[7] 康忠健,李丹丹,刘晓林.应用非工频暂态分量的配电网故障选线方法[J].电力自动化设备,2011,31(4):1-6.
[8] 张艳霞,王清亮.应用故障暂态特性实现配电网故障选线的新方法[J].电力系统自动化,2009,33(16):76-80.
[9] 郭谋发,刘世丹,杨耿杰.利用时频谱相似度识别的配电网接地选线方法[J].中国电机工程学报,2013,33(19):183-190.
[10] 王晓卫,侯雅晓,田书,等.基于时频原子灰色关联的小电流接地故障选线方法[J].煤炭学报,2014,39(10):2147-2156.
[11] 束洪春,高利,段锐敏,等.利用零序电流全量 Hough 变换的配电网故障选线方法[J].电力系统自动化,2013,37(9):110-116.
[12] 王晓卫,吴继维,李然月,等.基于 Prony 相对熵的故障投票选线新方法[J].中国电力,2013,46(1):59-64.
[13] 张淑清,翟欣沛,董璇,等.EMD 及 Duffing 振子在小电流系统故障选线方法中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(10):161-167.
[14] 田书,何金朋,聂赫.基于暂态零序能量的配电网故障选线方法研究[J].工矿自动化,2012,38(1):51-54.
[15] 黄锋,袁振海,庞宏宇.复小波在谐振接地系统故障选线中的应用研究[J].煤炭工程,2012(11):82-84.
[16] 李斌,束洪春.谐振接地系统单相接地故障瞬时功率分析[J].电网技术,2012(7):260-268.
[17] 褚福亮,金涛.基于 EEMD 和能量法的谐振接地配电网故障选线方法[J].福州大学学报:自然科学版,2015,43(2):207-213.
[18] 陈炯聪,齐郑,杨奇逊.基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J].电力系统自动化,2004,28(8):88-91.
[19] 熊浩,孙才新,张昀,等.电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J].电力系统自动化,2007,31(7):55-60.
[20] 徐岩,刘金生,张亚刚,等.基于模糊聚类理论的电网故障原件定位[J].电网技术,2010,34(8):188-193.