

文章编号:1671-251X(2013)02-0075-05

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.

基于经验模态分解差分谱的故障选线新方法

郑晨, 王晓卫, 刘雅娟, 田书

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要:提出了一种基于经验模态分解差分谱的小电流接地系统单相接地故障选线新方法。该方法采用经验模态分解方法分解故障发生后各条线路的暂态零序电流,提取出各条线路的高频 IMF_1 分量,并根据差分谱和波动值的定义,求出各条线路的 IMF_1 分量差分谱及 IMF_1 分量波动值;通过比较各条线路的 IMF_1 分量波动值,得出 IMF_1 分量波动值最大的线路,则该线路即为故障线路。仿真结果表明,该方法具有较高的选线准确度,适用于不同接地电阻与不同故障初相角情况下的小电流接地系统故障选线。

关键词:小电流接地系统;单相接地故障;故障选线;经验模态分解;高频 IMF_1 分量;差分谱;波动值;零序电流;EMD

中图分类号:TD608

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

A novel fault line selection method based on empirical mode
decomposition and differential spectrum

ZHENG Chen, WANG Xiao-wei, LIU Ya-juan, TIAN Shu

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

Abstract: The paper proposed a novel single-phase grounding fault line selection method of small current grounding system based on EMD and differential spectrum. The method uses EMD method to decompose transient zero-sequence current and extract high-frequency IMF_1 component of each line, obtained differential spectrum and fluctuation value of IMF_1 component of each line according to definitions of differential spectrum and fluctuation value, and found out the fault line which has the maximum fluctuation value of IMF_1 component by comparing fluctuation values of IMF_1 component of each line. The experiment results showed that the method has higher accuracy of line selection and is suitable for fault line selection of small current grounding system under different grounding resistances and different fault initial phase angles.

Key words: small current grounding system; single-phase grounding fault; fault line selection; empirical mode decomposition; high-frequency IMF_1 component; differential spectrum; fluctuation value; zero-sequence current; EMD

0 引言

目前,小电流接地系统单相接地故障选线方法

主要包括基于稳态信号的选线法^[1-2]和基于暂态信号的选线法^[3-12]。小电流接地系统发生单相接地故障后会产生丰富的暂态量信息,并且故障暂态量的

收稿日期:2012-11-19。

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(12B470002);河南省控制工程重点学科开放实验室资助项目(KG2011-15);河南理工大学青年基金项目(Q2012-28);河南理工大学第4批实验室开放基金项目(SKJB11046)。

作者简介:郑晨(1990—),男,河南驻马店人,在读本科生,主要研究方向为电力系统继电保护,E-mail:zhengchen725@163.com。

幅值比稳态量的幅值大十几倍甚至几十倍,因此,基于暂态信号的选线方法得到众多学者的普遍关注。参考文献[3]针对小波包选线装置存在的问题,通过对 S-粗集分析形成判据以实现故障选线。参考文献[4]采用故障零序电流首半波暂态信息提取特征频带,并计算出相对能量进行选线。参考文献[5]采用希尔伯特-黄变换提取故障零序电流的特征频带,并通过比较故障线路和非故障线路的非工频分量极性进行选线。参考文献[6]采用 S 变换提取故障信号暂态量,根据仙农模糊熵结合投票机制形成选线判据进行选线。参考文献[7]采用小波变换提取故障后的行波信息,构造判据以实现故障线路的判定。

本文利用经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 方法提取故障零序电流的特征频带,提出差分谱和波动值的概念,对特征频带信号的总体波动情况进行量化,通过比较各条线路的 IMF₁ 分量波动值的大小进行选线, IMF₁ 分量波动值最大的线路即为故障线路。在利用差分谱理论处理信号的过程中,相邻两时间点的信号值作差能够有效消除信号中的噪声,提高数据处理的准确性。仿真结果表明,基于经验模态分解差分谱的故障选线新方法具有很强的实用性,能广泛适用于中性点不接地、中性点经消弧线圈接地等小电流接地系统,对架空线路、电缆线路和电缆-架空线混合线路都具有很好的适用性。

1 小电流接地系统暂态特性分析

正常情况下,系统中有对称的三相对地电容,由于三相电压是对称的,则三相对地电容电流向量和等于零。对于中性点不接地系统,当发生单相接地故障时,流过故障点的电流为全系统非故障相电容电流之和,其有效值是正常运行时单相电容电流的 3 倍。

根据图 1, 可得以下微分方程式:

$$R_0 i_c + \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中: i_c 为暂态电容电流, 它由暂态自由振荡分量 i_{c1} 和稳态工频分量 i_{c2} 两个部分组成; C 为三相对地电容; U_m 为相电压幅值。

利用 $t=0$ 时, $i_{c1} + i_{c2} = 0$ 这一初始条件和 $I_{cm} = U_m \omega C$ 这一关系, 得

$$i_c = i_{c1} + i_{c2} = I_{cm} \left[\left(\frac{\omega t}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega t \right) e^{\delta t} + \right.$$

$$\left. \cos(\omega t + \varphi) \right]$$

式中: I_{cm} 为电容电流幅值; ωt 为暂态自由振荡分量的角频率; δ 为自由振荡分量的衰减系数, $\delta = 1/\tau_c = R_0/2L_0$, τ_c 为时间常数, R_0 为零序回路中的等效电阻(包括故障点的接地电阻和弧道电阻), L_0 为三相电路和电源变压器等在零序回路中的等效电感。

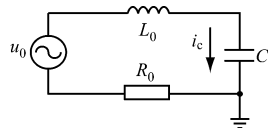


图 1 中性点不接地系统发生单相接地故障时的等效电路

2 理论分析

2.1 EMD 理论

EMD 通过对信号的筛选, 将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解出来, 产生一系列不同频率尺度的数据序列^[13-14], 每一个序列为一个固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。IMF 需满足 2 个条件:

- (1) 整个数据段内, 极值点的个数和零点的个数相等或至多差 1;
- (2) 在任何时间点上, 由局部极大值点形成的包络线和由局部极小值点形成的包络线的平均值为 0。

EMD 的具体筛选步骤:

- (1) 识别出信号 $x(t)$ 中的局部极大值点和局部极小值点, 从而求出其上包络线和下包络线的平均值 m_0 。

- (2) 用原数据序列 $x(t)$ 减去 m_0 后即可得到一个去掉低频的新数据序列 $h_1 = x(t) - m_0$; 判断 h_1 是否满足 IMF 条件, 若不满足, 将 h_1 看作新的 $x(t)$, 重复上述处理过程, 直到 h_1 满足 IMF 条件时, 记 $c_1 = h_1$, 视其为 IMF₁。

- (3) 将 $r = x(t) - h_1$ 看作新的 $x(t)$, 重复步骤 (1)、(2), 即可依次得到 IMF₂, IMF₃, ..., IMF_n, 直到满足以下 2 条终止条件中的任一条时筛选结束: ① 信号 c_n 或信号 r 的值非常低, 低于预先设定好的值; ② 信号 r 为时间的单调函数。

最后, 原始的数据序列 $x(t)$ 即可由这些 IMF 分量以及 1 个均值或趋势项 r 表示:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r \quad (3)$$

式中: 分量 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 包含了原信号从高到低不同频率段的成分; r 为原信号的平均趋势。

零序电流经 EMD 分解后所得到的 $IMF_1, IMF_2, \dots, IMF_n$ 中, 高频分量 IMF_1 包含的故障暂态特征量最多。因此, 本文提取各线路的 IMF_1 分量进行分析处理。

2.2 差分谱理论

故障线路和非故障线路零序电流的高频固有模态分量 IMF_1 的瞬时幅值和波动程度差别较大, 故障线路的 IMF_1 瞬时幅值和波动程度都比非故障线路的大。基于此, 提出差分谱的概念对波形的幅值和波动程度这 2 个特征进行提取。

定义: 对于含有 n 个元素 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 的离散信号函数 S , 记 $S = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$, 称

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}] \quad (4)$$

为 S 的差分谱, 其中 b_i 为 S 中的任意两相邻元素作差并取绝对值所得, 即 $b_i = |\sigma_i - \sigma_{i-1}|$ 。

差分反映的是一个数值到另一个数值的变化幅度, 即差分值的绝对值越大, 这种变化幅度就越大。因此, 信号的差分谱元素值的大小可以反映出该信号两相邻时间点的信号值变化幅度。差分谱中元素值越大, 两相邻时间点的信号值变化幅度就越大, 即差分谱中包含了原信号的幅值和波动程度 2 种信息。

3 基于 EMD 差分谱的故障选线步骤

3.1 选线判据

定义: 对于线路 l_k , 称

$$Q_{l_k} = \sum_{i=1}^{n-1} b_i^2 \quad (5)$$

为线路 l_k 的暂态零序电流 IMF_1 分量波动值。其中, k 为线路编号, $k=1, 2, \dots, m$; b_i 为线路 l_k 的零序电流 IMF_1 分量差分谱 B 中的元素。

波动值是由一系列信号的所有两相邻时间点的信号值作差并对该差值取平方, 然后把平方后的差值进行累加所得。平方运算可以放大大于 1 的数值, 缩小小于 1 的数值。故障线路的特征信号差分值总体上比非故障线路的特征信号差分值大, 因而经过波动值运算之后可以放大故障线路与非故障线路特征信号的差别, 进而明显地区分出故障线路与非故障线路。

基于以上分析, 可以形成以下选线判据:

对于含有 n 条馈线的系统, 当发生单相接地故障时, 各条线路的 IMF_1 分量波动值所组成的集合为 $\{Q_{l_i} | i=1, 2, \dots, n\}$, 其中 Q_{l_i} 为线路 l_i 的 IMF_1 分量波动值。若线路 l_j 的 IMF_1 分量波动值满足

$$Q_{l_j} > \{Q_{l_i} | i=1, 2, \dots, n, \text{且 } i \neq j\}$$

则线路 l_j 为故障线路, 否则线路 l_j 为非故障线路。

3.2 选线步骤

(1) 当系统发生单相接地故障时, 提取与母线相连接的各条馈线的故障后 1/10 个工频周期的零序电流 $I_{l_1}, I_{l_2}, \dots, I_{l_n}$ 。

(2) 对 I_{l_i} 进行 EMD 分解, 可以得到每条馈线的频率由高到低排列的一系列固有模态分量 $IMF_1, IMF_2, \dots, IMF_m$ 。

(3) 提取每条馈线的零序电流经 EMD 分解后得到的高频 IMF_1 分量, 并根据差分谱的定义, 求取每条线路特征信号的差分谱 b_i 。

(4) 利用每条馈线的差分谱, 根据波动值的定义求出每条线路的 IMF_1 分量波动值 Q_{l_i} 。

(5) 比较各条馈线的 Q_{l_i} , 求出 IMF_1 分量波动值最大的线路 l_k , 则 l_k 即为故障线路。

4 模型仿真

采用一个 4 出线的系统进行实验分析, 系统模型如图 2 所示。线路参数: 线路 l_1, l_2 为纯架空线, 长度分别为 13.5 km、24 km。线路 l_3 为缆-线混合线路, 其中电缆长为 5 km, 架空线长为 12 km。线路 l_4 为纯电缆线, 长度为 10 km。架空线路正序参数: $R_1 = 0.17 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 1.2 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 9.697 \text{ nF}/\text{km}$; 零序参数: $R_0 = 0.23 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 5.48 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 6 \text{ nF}/\text{km}$ 。电缆线路正序参数: $R_1 = 0.193 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 0.442 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 143 \text{ nF}/\text{km}$; 零序参数: $R_0 = 1.93 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 5.48 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 143 \text{ nF}/\text{km}$ 。采样频率 $f_s = 100 \text{ kHz}$ 。变压器连接方式为 Δ/Y , 变比为 220/35 kV。

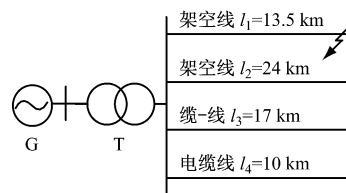


图 2 系统模型

考虑到在单相接地故障发生 1/4 周期后电流互感器容易饱和的实际情况, 本文仅提取系统发生故障后 1/10 个工频周期内的数据信息进行处理。

限于篇幅, 本文只给出在初相角为 0° 、接地电阻为 5Ω 的情况下发生故障时每条线路的 IMF_1 分量及其差分谱波形, 如图 3、图 4 所示。

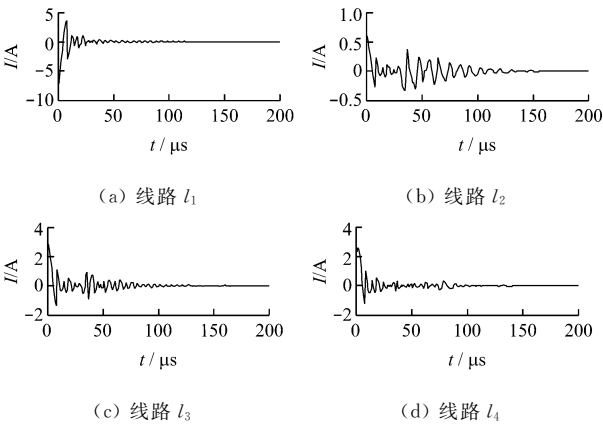


图 3 每条线路的 IMF₁ 分量波形

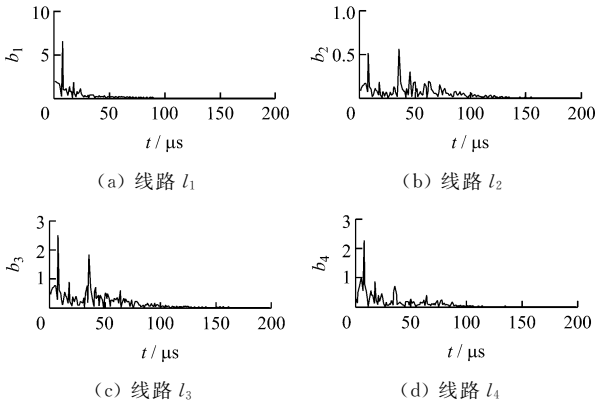


图 4 每条线路的 IMF₁ 分量差分谱波形

从图 3 可看出,故障线路 l_1 的 IMF₁ 分量的瞬时波动幅值 $I_{gm} > 4$ A,而非故障线路的 IMF₁ 分量瞬时波动幅值 $I_{fm} < 4$ A, I_{gm} 明显大于 I_{fm} ,因此,故障线路的 IMF₁ 分量的波动程度比非故障线路的大。信号波动程度的大小能够通过差分谱很好地显现出来,即信号在某相邻两时间点的波动程度越大,其相应的差分谱值也越大。

从图 4 可看出,故障线路 l_1 的 IMF₁ 分量的差分谱瞬时幅值 $b_{1gm} > 5$,而非故障线路的 IMF₁ 分量的差分谱瞬时幅值 $b_{1fm} < 3$,即 b_{1gm} 明显大于 b_{1fm} 。

取线路 l_1 的 20 种单相接地故障进行仿真:电压初相角分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ,接地电阻 R 分别为 5、50、100、500、1 000 Ω 。仿真结果如表 1~4 所示,其中 Q_{l_i} 为线路 l_i 的 IMF₁ 分量波动值。

表 1 初相角为 0° 时每条线路的 IMF₁ 分量波动值

R/Ω	Q_{l_1}	Q_{l_2}	Q_{l_3}	Q_{l_4}
5	78.313	1.483	21.666	13.542
50	54.731	1.001	14.834	9.573
100	35.696	0.698	10.118	7.025
500	7.557	0.129	2.410	1.633
1 000	2.771	0.047	0.868	0.959

表 2 初相角为 30° 时每条线路的 IMF₁ 分量波动值

R/Ω	Q_{l_1}	Q_{l_2}	Q_{l_3}	Q_{l_4}
5	19.410	0.354	8.360	3.366
50	13.490	0.240	4.832	2.397
100	8.714	0.163	2.535	1.736
500	1.866	0.031	0.595	0.404
1 000	0.686	0.011	0.217	0.147

表 3 初相角为 60° 时每条线路的 IMF₁ 分量波动值

R/Ω	Q_{l_1}	Q_{l_2}	Q_{l_3}	Q_{l_4}
5	37.399	0.803	11.715	7.582
50	25.816	0.545	8.151	5.270
100	18.569	0.390	5.645	3.880
500	3.854	0.082	1.293	0.810
1 000	1.396	0.030	0.470	0.298

表 4 初相角为 90° 时每条线路的 IMF₁ 分量波动值

R/Ω	Q_{l_1}	Q_{l_2}	Q_{l_3}	Q_{l_4}
5	502.011	0.023	0.512	9.920
50	458.853	0.019	0.274	0.187
100	0.665	0.013	0.189	0.481
500	0.145	0.002	0.043	0.030
1 000	0.060	0.001	0.017	0.011

在初相角为 0° 的情况下,接地电阻为 5 Ω 时, $Q_{l_1} = 78.313$, $Q_{l_2} = 1.483$, $Q_{l_3} = 21.666$, $Q_{l_4} = 13.542$,显然有 $Q_{l_1} > Q_{l_2}$, $Q_{l_1} > Q_{l_3}$, $Q_{l_1} > Q_{l_4}$,接地电阻分别为 50、100、500、1 000 Ω 时,各线路的 Q_{l_i} 也满足这一关系。在初相角分别为 30° 、 60° 、 90° 的情况下,接地电阻分别为 50、100、500、1 000 Ω 时,各线路的 Q_{l_i} 也满足上述规律,即满足 $Q_{l_1} > \{Q_{l_i} \mid i=2,3,4\}$ 。

根据以上分析可得出,故障线路的 IMF₁ 分量波动值在不同接地电阻与不同故障初相角情况下均大于所有非故障线路的 IMF₁ 分量波动值,因此,根据这一特点可以实现准确选线。

另一方面,从表 4 可看出,在初相角为 90° ,接地电阻为 1 000 Ω 时, $Q_{l_1} = 0.060$, $Q_{l_2} = 0.001$, $Q_{l_3} = 0.017$, $Q_{l_4} = 0.011$ 。总体来说,该种故障情况下,虽然也满足故障线路的 IMF₁ 分量波动值大于所有非故障线路的波动值,但各分支线路的 IMF₁ 分量的波动值均较小,在实际应用中,有可能会受现场运行环境的影响,从而发生选线错误。因此,对于该类故障情况下的故障选线,有必要安装一定的抗干扰装置。

5 结论

提出了一种基于经验模态分解差分谱的故障选线新方法,在不同故障初相角和不同接地电阻的情况下,对小电流接地系统的单相接地故障进行了仿真,得出以下结论:

- (1) 采用 EMD 提取特征频带,基函数由信号本身自适应得到,可以得到很好的分解效果。
- (2) 采用差分方法处理信号值,在求取波动值的过程中可以消除噪声信号,进而有效提高选线的准确度。
- (3) 在电压初相角为 90° 、高阻接地故障时,线路的 IMF_1 分量波动值较小,容易受到干扰的影响,需安装抗干扰装置。

参考文献:

[1] 马春艳,龚瑛,侯贺军. 基于综合稳态分量的补偿电网故障选线[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):89-92.

[2] 唐铁,陈庆,刘昊. 补偿电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化,2007,31(16):83-86.

[3] 庞清乐,华臻. 基于 S-粗集的小电流接地故障选线研究[J]. 煤炭学报,2008,33(10):1182-1186.

[4] 束洪春,彭仕欣. 配网电缆-线混合线路故障选线相对能量法[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):1-5.

[5] 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.

[6] 张钧,何正友,贾勇. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):109-115.

[7] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):1-6.

[8] 陈奎,唐铁. 小电流接地系统单相接地故障选线的研究[J]. 高电压技术,2007,33(11):185-189.

[9] 贾清泉,杨奇逊,杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):6-11.

[10] 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.

[11] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.

[12] 孔瑞忠,董新洲,毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的试验[J]. 电力系统自动化,2006,30(5):63-67.

[13] HUANG N E, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1999,340(31):417-457.

[14] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London,1998,454(1):903-911.