

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221798

基于行波时差信息的输电线路分布式故障定位矩阵算法

周福涛¹, 李京^{1,2}, 刘哲³, 王一诺³, 陈平¹, 胡顺财¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255049; 3. 山东省淄博市技师学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 针对传统分布式测距先选故障区域后故障定位的繁琐逻辑顺序问题, 提出了一种基于行波时差信息的输电线路分布式故障定位矩阵算法, 该算法利用双端行波测距原理, 将监测节点数据两两结合构建下三角故障定位矩阵, 通过矩阵秩的性质同时进行故障点区域选择及故障定位距离计算, 并设置矩阵调零算法, 加速矩阵秩的求取; 设置距离修正算法, 提高定位结果精确度。利用 PSCAD、MATLAB 软件建模仿真, 验证了输电线路分布式行波故障定位矩阵算法的适用性及可靠性, 在运算过程中对比证明了修正调零算法的必要性及距离修正算法对故障定位精度的显著提高。

关键词: 分布式行波故障定位; 行波时差信息; 矩阵算法; 秩

中图分类号: TM755

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0209-05

1 引言

随着我国输电容量的增加, 远距离高压输电线路大幅增加且发挥着十分重要的作用。双端行波测距法由于其波头识别相较于单端行波测距法的一次反射波波头识别简单, 所以在行波测距中应用更广泛^[1,2]。但当双端行波测距装置的其中一个装置出现故障或产生数据误差时, 装置故障会使双端测距无法进行, 此时只有一个测距装置无法实现双端行波测距。测距装置产生误差数据时, 误差数据难以发现, 最终得到的定位结果也因误差数据而受影响。传统分布式行波测距中需将多个监测装置均匀安装在输电线路中^[3], 将输电线路分成多段可减少测距中因输电线路线长所带来的误差, 且多个监测装置的使用可在其中一装置发生故障时, 利用其余装置相互配合测距。但实际上由于地形等自然因素影响难以将设备恰巧均匀分布在线路中^[4,5]。且传统分布式行波测距算法通常采取的是先选取故障区域再进行故障定位的逻辑, 逻辑流程繁琐, 在应用中效率较低。针对传统分布式行波测距算法中的问题, 本文在传统双端测距算法的基础上建立分布式输电线路矩阵算法^[6,7], 实现输电线路中分布式监测装置不

均匀分布的情况下达到故障区域选取与故障点定位同时进行, 简化了算法流程, 提高了效率。

2 故障矩阵算法

2.1 故障矩阵基本原理

输电线路发生故障时, 安装在输电线路的分布式行波故障监测装置监测到故障暂态行波并提取波头时间, 假设 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 分别为监测节点 1、2、3、 \dots 、 n 提取的线模电流波头到达时刻; $l_1, l_2, l_3, \dots, l_{n-1}$ 分别为各相邻节点之间的区间线路长度; F 为线路设置故障点位置; M、N 为输电线路两端; Y 为故障点距离右端最近监测节点距离。图 1 为假设故障点位于节点 2 与节点 3 之间的输电线路模型结构。

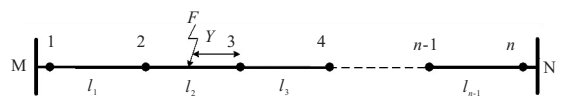


图 1 输电线路结构

Fig. 1 Transmission line structure

利用双端测距原理, 将各节点线模电流波头时刻两两结合计算得到故障矩阵 A 。由于输电线路共有 n 个节点数, 理论上通过双端行波测距算法可得到 $n(n-1)/2$ 个计算结果, 将其列为 $(n-1$

收稿日期: 2022-08-30, 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902800); 国网公司科技项目(52094017003D)

作者简介: 周福涛(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障监测, E-mail: 610527130@qq.com

1)阶下三角矩阵形式 \mathbf{A} ,图 1 输电线路结构得到矩阵 \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{(n-1)1} & A_{(n-1)2} & A_{(n-1)3} & \cdots & A_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $A_{ij}(i=1,2,\dots,n-1;j=1,2,\dots,n-1)$ 具体计算式为:

$$\begin{cases} A_{ij} = [d_{(i+1)j} - (t_j - t_{i+1})v]/2 & i+1 > j \\ A_{ij} = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, A_{ij} 为节点 $i+1$ 与节点 j 进行双端行波测距计算,如 A_{11} 表示对节点 2 与节点 1 的行波信息进行双端测距计算,由于矩阵为下三角矩阵,所以满足 $i+1 > j$; $d_{(i+1)j}$ 为节点 $i+1$ 与节点 j 之间的输电线路长度,由图 1 可知, $d_{21}=l_1$ 、 $d_{31}=l_1+l_2$ 。

输电模型(图 1)利用式(2)得到矩阵 \mathbf{A} ,其中 A_{ij} 的计算结果表示当故障点位于两个计算节点之间故障点到其中右侧节点的距离,利用故障点到最近右侧节点距离 Y 与相邻两节点间线路长度 l 改写矩阵 \mathbf{A} ,则式(1)中的 $A_{21}=Y$ 、 $A_{31}=Y+l_3$,具体可改写为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{(n-1)1} & A_{(n-1)2} & A_{(n-1)3} & \cdots & A_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ Y & Y & 0 & \cdots & 0 \\ Y+l_3 & Y+l_3 & l_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y+l_3+l_4+\dots+l_{n-1} & Y+l_3+l_4+\dots+l_{n-1} & l_3+l_4+\dots+l_{n-1} & \cdots & l_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

理想情况下,利用式(2)建立下三角矩阵(式(3)),其为故障点位于节点 2、3 之间时得到的故障矩阵,由于计算中当两节点均位于故障点左侧时 $A_{ij}=0$,即假设共有 n 个节点数据,当故障点左侧临近节点为第 x 个,则矩阵的前 $(x-1)$ 行元素 A_{ij} 均为 0,所以 $(n-1)$ 阶矩阵中矩阵的秩 $k=(n-1)-(x-1)=n-x$,即 $x=n-k$,则可推断故障区域位于第 $(n-k)$ 节点与第 $(n-k+1)$ 节点装置之间。利用 A_{ij} 表示节点 $i+1$ 与节点 j 进行双端测距的计算结果及 $i+1 > j$ 的关系,推断由第 $(n-k)$ 节点与第 $(n-k+1)$ 节点进行双端

测距的计算结果在矩阵中的位置为 $A_{(n-k)(n-k)}$ 。由式(3)可知矩阵秩 $k=n-2$,即可得故障点位于 2、3 节点之间,同时得到初步故障距离为 $A_{22}=Y$ 。

2.2 故障矩阵的修正调零

实际计算中故障矩阵 \mathbf{A} 中难以计算出相应 A_{ij} 位置为 0,从而影响矩阵秩的结果。对此,在计算出矩阵 \mathbf{A} 后需对矩阵 \mathbf{A} 进行算法调零。

调零算法原理指故障矩阵 \mathbf{A} (见式(3))存在一行(第 x 行)的前 x 项均值(式(3)中 Y)小于线路 l_x 长度,且第 $x+1$ 行的前 x 项均值(式(3)中 $Y+l_3$)大于线路 l_{x+1} 长度($x=1,2,3,\dots,n-1$);当故障点发生在线路最后两节点之间时只需矩阵 \mathbf{A} 的 $n-1$ 行的前 $n-1$ 项均值小于线路 l_{n-1} 长度,其中 n 为节点数量。

当矩阵第 x 行满足调零算法原理所述的关系时,则矩阵第 x 行前的所有行向量元素(不包括第 x 行)均为 0。具体可列相关判断公式为:

$$\begin{cases} \frac{1}{x} \sum_{k=1}^x A_{xk} < l_x, \frac{1}{x} \sum_{k=1}^x A_{(x+1)k} > l_{x+1} & x < n-1 \\ \frac{1}{x} \sum_{k=1}^x A_{xk} < l_x & x = n-1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, l_x 、 l_{x+1} 分别为各节点之间线路 l 长度; A_{xk} 、 $A_{(x+1)k}$ 分别为矩阵 \mathbf{A} 中相应位置的元素; k 为故障定位矩阵的秩; n 为输电线路节点数。

经过调零算法对初始故障矩阵进行数据调零,可得到式(3),由 n 个节点数据构成的 $n-1$ 阶矩阵故障矩阵 \mathbf{A} 。

2.3 距离修正

构建故障定位矩阵计算中使用到的波速多为理论波速,实际中由于输电线路导线属性、天气等自然因素的影响,使实际波速与理论波速有明显差距。对此,在利用矩阵的秩初步得到故障区间及大体位置后,加入故障区间临近节点构建波速修正公式,然后代入双端行波测距公式得到距离修正公式。根据故障点区域选择的距离修正算法节点不同,具体可分为两种情况:①当故障区域为节点 1 与节点 2 之间时,利用节点 2、3 与两节点之间线路距离 l_2 ,求得实际波速 $v=l_2/(t_3-t_2)$ 。②当故障区域不在节点 1 与节点 2 之前,即可利用故障定位矩阵算法得到矩阵的秩为 $n-k \neq 1$ 时,可利用第 $(n-k-1)$ 节点与第 $(n-k)$ 节点,故障区域左临区域线长 l_{n-k-1} ,求得实际波速 $v=l_{n-k-1}/(t_{n-k-1}-t_{n-k})$ 。

将实际波速代入双端测距算法从而得到距离修正公式 Y 为:

$$Y = \begin{cases} [l_1 - (t_1 - t_2)L_2 / (t_3 - t_2)] / 2 & k = n - 1 \\ \frac{1}{2} \left[l_{n-k} - (t_{n-k} - t_{n-k+1}) \frac{l_{n-k-1}}{t_{n-k-1} - t_{n-k}} \right] & k \neq n - 1 \end{cases} \quad (5)$$

2.4 输电线路矩阵算法流程

利用长距离高压输电线路上的分布式行波故障测距装置采集行波信号,通过 GPS/北斗卫星系统同步授时,进行行波信号变换并传输至云平台。云平台对各监测点数据进行预处理,其中包括为减小暂态行波的相间耦合而采取克拉克(Clark)变换及矩阵进行行波信号的线模变换后得到线模电流。具体输电线路矩阵算法流程图见图 2。

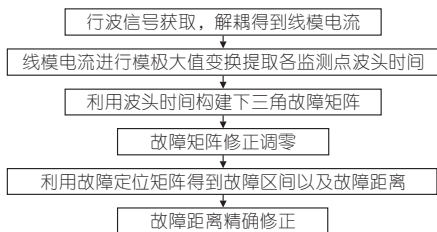


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

3 算例分析

3.1 仿真 1

利用 PSCAD 建立输电线路模型(图 3)通过 MATLAB 软件构建算法处理与计算仿真数据,5 个监测节点间的距离分别为 28.5、31.0、27.0、32.5 km,并在节点 2 与节点 3 之间并距离节点 3 的 16 km 处设置故障点,经过数据预处理(图 4)分别得到各节点监测到的行波线模电流波头到达时间 $t_1、t_2、t_3、t_4、t_5$ 分别为 145.5、50.4、53.7、143.9、252.4 μs ,计算中取波速 $v=0.297 \text{ km}/\mu\text{s}$ 。

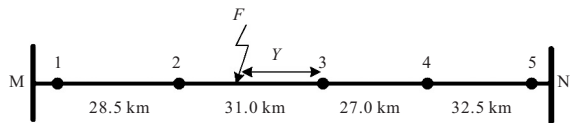


图 3 输电线路模型

Fig. 3 Transmission line model

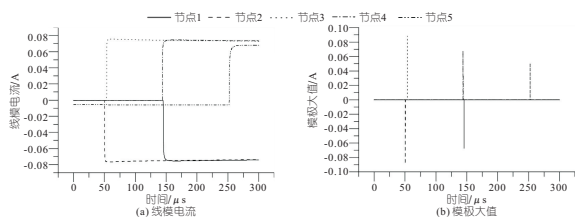


图 4 线模电流小波变换

Fig. 4 Wavelet transform of line mode current

利用已有数据信息,通过式(2)建立故障定位

矩阵 A_1 :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.127\ 65 & 0 & 0 & 0 \\ 16.117\ 70 & 15.990\ 05 & 0 & 0 \\ 43.012\ 40 & 42.884\ 75 & 26.894\ 70 & 0 \\ 75.374\ 65 & 75.247\ 00 & 59.256\ 95 & 32.362\ 25 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过矩阵调零公式对矩阵 A_1 进行算法调零,验证得到矩阵第二行满足式(4),调零后得到矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16.117\ 70 & 15.990\ 05 & 0 & 0 \\ 43.012\ 40 & 42.884\ 75 & 26.894\ 70 & 0 \\ 75.374\ 65 & 75.247\ 00 & 59.256\ 95 & 32.362\ 25 \end{bmatrix} \quad (7)$$

计算得到矩阵 A 的秩 k 为 3,输电线路模型上节点数 $n=5$,由 $(n-k)$ 与 $(n-k+1)$ 得到故障区间为第 2、3 个节点之间,同时从矩阵 A 中得到第 3 个节点初步距离为 $A_{(n-k)(n-k)}$:

$$A_{(n-k)(n-k)} = A_{22} = 15.990\ 05 \text{ km} \quad (8)$$

通过式(5)利用节点 1、2、3 与线路长度 $l_1、l_2$ 进行距离修正计算 $Y=15.994\ 5 \text{ km}$ 。

输电线路故障仿真模型设置的故障为 2、3 节点之间区域故障,故障点设置为距离节点 3 为 16 km,通过故障定位矩阵可同时得到故障点区域为节点 2 与节点 3 之间及距离故障节点 3 的初步定位距离为 15.990 05 km,与模型设置故障点距离误差为 0.009 95 km。然后通过距离修正公式计算得到故障定位距离为 15.994 5 km,与实际设置距离误差为 0.005 5 km。通过仿真试验验证了矩阵算法可同时得到故障点区域及初始故障定位距离且结果较准确,距离修正算法修正后得到的故障定位距离结果与初始故障定位距离结果相比精确度更高。

3.2 仿真 2

仿真试验 2 与图 4 输电线路模型相同,在节点 4 与节点 5 之间并距离节点 5 的 7.5 km 处设置故障点,经过数据预处理(图 5)分别得到各节

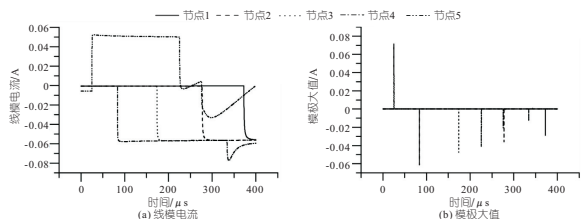


图 5 模极大值变换

Fig. 5 Model maximal value transformation

点监测到的行波线模电流波头到达时间 $t_1、t_2、t_3、t_4、t_5$ 分别为 372.6、277.5、173.9、83.8、25.3 μs ，取波速 $v=0.297 \text{ km}/\mu\text{s}$ 。

利用已有数据信息，通过式(2)建立故障定位矩阵 A_1 ：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.127\ 65 & 0 & 0 & 0 \\ 0.243\ 05 & 0.115\ 40 & 0 & 0 \\ 0.363\ 20 & 0.235\ 55 & 0.120\ 15 & 0 \\ 7.925\ 95 & 7.798\ 30 & 7.682\ 90 & 7.562\ 75 \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过矩阵调零公式对矩阵 A_1 进行算法调零，验证得到矩阵第四行满足式(10)，修正调零后得到矩阵 A ：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.925\ 95 & 7.798\ 03 & 7.682\ 90 & 7.562\ 75 \end{bmatrix} \quad (10)$$

计算得到矩阵 A 的秩为 1，由 $(n-k)$ 与 $(n-k+1)$ 得到故障区间为第 4、5 个节点之间，同时从矩阵 A 中得到第 5 节点初步距离为 $A_{(n-k)(n-k)} = 7.562\ 75 \text{ km}$ 。

通过式(5)利用节点 3、4、5 进行波速修正计算 $Y=7.484\ 739\ 179 \text{ km}$ 。

输电线路故障仿真模型设置的故障为 4、5 节

点之间区域故障，故障点设置为距离节点 5 为 7.5 km，通过故障定位矩阵可同时得到故障点区域(节点 4、5 之间)及距离故障点 5 初步定位距离 7.562 75 km，与实际设置距离误差为 0.062 75 km。然后通过三节点波速修正计算的故障定位距离为 7.484 739 179 km，与实际设置距离误差为 0.015 260 821 km。对比可知波速修正具有明显的减小测距误差的优势。

3.3 其他区段故障仿真试验

与仿真试验算法流程相同，在相同输电线路模型的不同区段的不同位置分别设置故障点，获得算法计算得到的初步故障定位结果与误差、距离修正后故障定位结果与误差见表 1。由表 1 可知，故障点位置及故障区段的变化均对算法计算结果影响较小，初始故障定位误差对比说明本文算法在实际应用中适用广泛，通过修正故障定位误差对比说明经过距离修正算法修正后的故障定位结果更接近于实际设置故障点距离，证明了距离修正算法的可靠性及使故障点定位更精确。总体来说，经过分布式故障定位算法的初步计算可得到故障点区域及故障点的大体位置，有利于故障点的初期筛选定位。加入距离修正算法可使故障点位置相较于初步计算结果更精确，有利于故障点后期的精确定位检修。

表 1 长度 119 km 输电线路不同位置故障试验

Tab. 1 Experiments on faults at different locations of 119 km long transmission lines

故障区段两 侧节点设置	故障点距离 右邻节点距离/km	仿真计算 结果/km	初步 误差/km	初步误差 百分比/%	修正计算 结果/km	修正 误差/km	修正误差 百分比/%
1-2	23.5	23.427 30	0.072 70	0.061 1	23.505 072 460	0.005 072 464	0.004 3
1-2	18.5	18.467 40	0.032 60	0.027 4	18.503 140 100	0.003 140 097	0.002 6
1-2	15.5	15.482 55	0.017 45	0.014 7	15.491 795 370	0.008 204 633	0.006 9
2-3	4.0	4.110 05	0.110 05	0.092 5	4.019 170 168	0.019 170 168	0.016 1
2-3	23.0	22.939 85	0.060 15	0.050 5	22.999 212 180	0.000 787 815	0.000 7
2-3	16.0	15.990 05	0.009 95	0.008 4	15.994 479 500	0.005 520 505	0.004 6
3-4	7.0	7.055 10	0.055 10	0.046 3	7.000 483 092	0.000 483 092	0.000 4
3-4	20.0	19.944 90	0.055 10	0.046 3	19.999 516 910	0.000 483 092	0.000 4
3-4	15.0	14.985 00	0.015 00	0.012 6	14.997 584 540	0.002 415 459	0.002 0
4-5	7.5	7.562 75	0.062 75	0.052 7	7.484 739 179	0.015 260 821	0.012 8
4-5	29.5	29.392 25	0.107 75	0.090 5	29.495 565 410	0.004 434 590	0.003 7
4-5	15.5	15.492 65	0.007 35	0.006 2	15.495 849 060	0.004 150 943	0.003 5

3.4 矩阵算法与其他测距算法对比

在仿真 1 的输电模型的基础上，利用故障数据将矩阵算法分别与小波算法、传统双端测距算法计算结果对比，结果见表 2。由表 2 可知，本文采用的矩阵算法的准确度大大高于其他两种算法，说明了矩阵算法的精确性。

表 2 距离节点 1 43.5 km 处故障点不同测距算法对比

Tab. 2 Comparison of different fault location algorithms

at 43.5 km from node 1

算法	结果/km	误差/km	误差百分比/%
矩阵算法	43.505 523 5	0.005 523 5	0.004 6
小波算法	43.625 350 0	0.125 350 0	0.105 3
传统双端测距算法	44.615 350 0	1.115 350 0	0.937 3

4 结论

a. 提出了利用矩阵秩的性质同时实现故障区域选取及故障点定位的下三角故障定位矩阵算法,避免了传统矩阵算法数据重复利用情况,减小了计算量,提高了运算效率。

b. 在计算过程中加入矩阵调零算法及距离修正算法,经过仿真试验对比验证矩阵调零算法的实用性及距离修正算法使修正后故障定位结果比初步定位结果更精确。

参考文献:

- [1] 张凯,杨建平,徐建委,等.基于神经网络的输电线路行波故障测距方法[J].水电能源科学,2018,36(2):184-187.
- [2] 赵肖雪,辛正祥,宋吉江,等.基于小波包多尺度分

析的多时间窗行波相关法[J].水电能源科学,2019,37(9):202-205.

- [3] 王博,谷昌瑞,吉晓筱,等.基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J].电力工程技术,2017,36(5):120-127.
- [4] 张恽宁,孟令军,王越杨.基于非接触式行波采集的分布式高压直流故障测距方法[J].电网与清洁能源,2020,36(4):55-59,65.
- [5] 李宏亮,谷会苗.输电线路分布式故障测距探析[J].通信电源技术,2017,34(1):128-129.
- [6] 张文轩,李京,王雪菲.基于多端行波信息的配电网故障定位改进矩阵算法[J].水电能源科学,2021,39(6):194-197,170.
- [7] 姜雨轩,窦震海,陈平,等.基于行波时差矩阵算法的 10 kV 电缆网络故障定位[J].水电能源科学,2020,38(7):184-188.

Distributed Fault Location Matrix Algorithm of Transmission Lines Based on Traveling Wave Time Difference Information

ZHOU Fu-tao¹, LI Jing^{1, 2}, LIU Zhe³, WANG Yi-nuo³, CHEN Ping¹, HU Shun-cai¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Kehui Electric Power Automation Co., Ltd., Zibo 255049, China;

3. Zibo Technician College, Shandong Province, Zibo 255049, China)

Abstract: For the transmission line distributed traveling wave fault ranging system, this paper proposes a distributed fault location matrix algorithm of transmission lines based on traveling wave time difference information. The algorithm uses the principle of double-ended traveling wave ranging to construct the lower triangular fault location matrix by combining the monitoring node data two by two. The nature of matrix rank was used to select the fault point area and calculate the fault location distance simultaneously. The matrix zeroing algorithm was set to accelerate the find of matrix rank. The distance correction algorithm was set to improve the accuracy of positioning results. The applicability and reliability of the distributed traveling wave fault location matrix algorithm for transmission lines were verified by modeling and simulation with PSCAD and MATLAB software. The necessity of the corrected zeroing algorithm and the significant improvement of the distance correction algorithm on the fault location accuracy were demonstrated by comparison during the operation.

Key words: distributed traveling-wave fault location; traveling-wave time difference information; matrix algorithm; rank

(上接第 195 页)

RSO Experimental Optimization Method for Rotor Set of Large Supercritical Generator Set

WU Hong-liang, LI Yong, HAO Chun-yuan, SHANG Kun

(Guoneng Hebei Dingzhou Power Generation Co., Ltd., Dingzhou 073000, China)

Abstract: To improve the state detection effect of large supercritical generator rotor set, the RSO (Cyclic Periodic Electrical Impulse) detection method of large supercritical generator rotor set based on time difference calculation is designed. According to the principle of RSO detection method, the characteristics of time difference pulse signal are extracted. The detection model of coil short circuit is constructed according to the time difference characteristics of signal. Wavelet transform is used to denoise the time difference signal. Fix the rotor position and winding parameters are fixed to determine the fault position of the rotor set. Thus, the RSO detection of the rotor set of large supercritical generator unit is realized. The experimental results show that the difference between the detection results of the power spectrum amplitude of the initial rotor position, the rotor position at startup, the normal broken bar and the broken bar fault is small, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: time difference calculation; critical generator set; rotor; RSO detection