

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221630

时间差计算下的大型超临界发电机组转子绕组 RSO 检测方法

吴宏亮, 李 勇, 郝春元, 尚 坤

(国能河北定州发电有限责任公司, 河北 定州 073000)

摘要: 为提高大型超临界发电机组转子组状态检测效果, 设计时间差计算下的大型超临界发电机组转子组循环周期性电脉冲(RSO)检测方法, 即基于 RSO 检测法原理提取时间差脉冲信号特征, 根据信号时间差特征构建线圈短路检测模型, 利用小波变换方法进行时间差信号去噪处理, 并固定转子位置与绕组参数, 确定转子组故障位置, 从而实现大型超临界发电机组转子组 RSO 检测。试验结果表明, 该方法对电机初始转子位置、启动时转子位置、断条正常、断条故障时功率谱幅值的检测结果与实际值均相差较小, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 时间差计算; 临界发电机组; 转子; RSO 检测

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0192-04

1 引言

目前, 大型发电机的使用率逐年上升, 大型发电机的转子旋转速率高于以往发电机, 一旦发生故障或区间短路, 就会影响整个发电机组。出现故障时, 尽早发现故障位置尤为重要。近年来, 利用多次试验检测来解决复杂的转子组线路问题, 从而提出了发电机转子的循环周期性电脉冲(RSO)检测理论。RSO 检测法通过在定子上施加电压脉冲, 产生电磁场波束, 将其传输到转子组中, 以实现转子组的控制, 在移动过程中同时检测转子组匝间的线路问题, 并进行反馈报告, 跟踪短路位置的信号变化, 按信号波动的曲线图进行定位。其具有灵敏度高、定位精确、使用方便等优点, 为电力系统的安全运行提供了保障。鉴此, 本文将 RSO 试验优化方法应用到发电机转子组检测中, 以提高发电机组转子组检测效果。

2 时间差脉冲信号特征提取

RSO 检测法就是在转子组两端发出信号, 随着信号的传播进行分段检测, 根据脉冲波变化特征模拟发电机组的故障。在理想状态下可认定信

号周围的磁场与电势是同步的^[1]。而当信号检测到故障位置, 匝间的周围磁场会立即消失, 多个脉冲波的反射波会同时聚集到一起, 在其故障部分就会出现一个过渡负信号^[2], 而各信号的时间差不同, 为此需对其处理, 其表达式为:

$$S(t) = B[u(t)\sin(16 \times 2\pi t) - au(t - t_1) + au(t - t_2)\sin(16 \times 2\pi t)] \quad (1)$$

其中
$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

式中, $S(t)$ 为时间差转换函数; u 为电压; t 为信号发射时间; t_1 为信号过渡时间; t_2 为信号反射到两端的时间; B 、 a 均为常数, 令 $B=0.1$ 、 $a=0.9$, 那么转子组表面的某些区域存在微小的凹凸不平, 这些不平的高度差约为 0.1 mm, 因此在采集局部信号时, 就会显示短路部位的脉冲波异常活跃, 也可看作稳态的故障脉冲波。

但随着设备复杂程度的不断增加, 发电机组中每一个携带任务的信号自身均存在能量, 这种能量与故障特征形成纠缠, 大幅干扰了正常故障特征的反馈信号。当脉冲信号的能量达到峰值^[3], 遭遇短路故障, 其自身能量就会立即削弱, 提前反射回转子组原点, 假设离散信号用 x 表示, 波长为 N , 那么传播过程中信号所余留的时间 E_k ^[4] 为:

收稿日期: 2022-08-08, 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 河北国华定州发电有限责任公司“盘车状态下汽轮发电机转子 RSO 试验的研究与应用科技项目”(河北定州电厂(2021)73号)

作者简介: 吴宏亮(1974-), 男, 高级工程师, 研究方向为火力发电厂电气设备及设备诊断, E-mail: jiao16397837@163.com

$$E_k = \sum_{i=1}^N x_i^2 k \quad (2)$$

式中, x_i 为在短路点的电压; k 为传播时间; i 为信号数量。

大量信号逐个进入发电机组中,随着时间的增长、噪声的不断影响,其自身带有的能量逐渐减少,为使信号能顺利传播,利用不同信号的时间差,来获取波形的能量变化特征。

在式(1)、(2)的基础上对能量特征进行优化,得到一定时间内信号所使用的功率 \bar{P}_k 为:

$$\bar{P}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 k \quad (3)$$

结合趋势因子 δ , 相时间差信号特征函数为:

$$C_k = E_k - k\delta = \sum_{i=1}^N x_i^2 k - k\delta \quad (4)$$

其中 $\delta = S_N / (xN)$

式中, S_N 为信号的全部能量。

基于发电机组现场的实际情况,噪声必定存在,噪声变大时, x 值会相对变小,再加上趋势因子的影响,就可明确波形最弱时的位置在转子组两端^[5],这种时间差信号传播函数为:

$$\partial C_k / \partial k = x_k^2 - S_N / (xN) \quad (5)$$

根据 RSO 的波形来判断转子组中线圈中心位置短路偏差率 Δ , 其公式为:

$$\Delta = (U_d / U_m) \times 100\% \quad (6)$$

式中, U_d 为转子组两端的电压差; U_m 为脉冲波的电压峰值。

基于式(1)~(6)完成对时间差脉冲信号的提取,为转子组重复脉冲检测提供基础依据。

3 构建基于时间差信号的线圈短路检测模型

在检测时间差信号时,还要考虑到影响信号传播的各种因素,包括电场或磁场。带有时间差值的脉冲波,从转子组端点正常出发,利用仪器最大地减少磁场的影响^[6],但仍会剩余残存的不完整磁场能量,当这种信号通过不饱和磁场时,转子处于旋转状态,其周围的磁场用 $B(t)$ 来表示,初始磁场能量用 $B_0(t)$ 来表示,反应磁场用 $B_a(t)$ 来表示,那么这种关系表达式为:

$$B(t) = B_0(t) + B_a(t) \quad (7)$$

而发电机线路上可检测到的时间差脉冲波的电势 $e(t)$ ^[7] 为:

$$e(t) = -\omega d\varphi(t) / dt \quad (8)$$

式中, ω 为传播角度; t 为时间; φ 为折射角度。

设传播系数 $K = -\omega S$ (S 为发电机组中线圈的横截面积^[8]), 则检测模型为:

$$\begin{cases} h(t) = K\omega_n [a_m(t - A/2) + b_m] \cos(\omega_n t + \pi) \\ g(t) = K [3a_m(t - A/2)^2 + b_m] + \\ K\omega \cos(\omega t + \varphi_0 + \delta) \end{cases} \quad (9)$$

得到:

$$e(t) = h(t) + g(t) \quad (10)$$

式中, b_m 为感应磁场; a_m 为感应电场; A 为端点磁场; φ_0 为初始反射角度; ω_n 为角度旋转的频率; $g(t)$ 为低频脉冲波; $h(t)$ 为高频脉冲波。

线圈匝数越密集,高频信号越多,波形图越活跃。

4 基于小波变换的时间差信号去噪

小波分析法是可表示发电机转子组窗口面积大小和形状随机改变的一种信号处理方法。它不限于时间或空间的改变,还解决了傅里叶变换未能将信号分段处理的缺点,且具有超强特征识别功能,适用于信号处理的整个过程,尤其是突变阻抗。假设存在小波函数 $\psi(t)$, 将其结构与位置进行变化后的公式为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \neq 0 \quad (11)$$

式中, a 为结构因子; b 为移动因子。

随机序列函数 $f(t)$ 经变换后的函数序列为:

$$f(t) = \frac{1}{c_v} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (12)$$

式中, c 为电容量; v 为速率; W 为变换函数。

小波函数 $\psi(t)$ 经周围的影响后,会呈伸缩或放大的形式,分散后的信号波经传播后就变成了离散的小波函数序列。假设 V_j 为小波分析, $\varphi(x)$ 为尺度函数,且 $f(x) \in V_0$ (V_0 为信号传输的初始速率), 则有小波函数尺度 C_j 的递推关系为:

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j \\ D_{j+1} = GC_j \end{cases} \quad (13)$$

式中, C_{j+1} 、 D_{j+1} 分别为平滑系数、对称系数; j 为尺度因子; H 、 G 分别为高频、低频信号的滤波器。

而针对发电机组转子组的短路检测,实质上就是在转子探测圈上测量周围的磁场与脉冲波的变化,对于影响转子组的各种因素,包括线圈的密集程度、电枢反应或发电机的位置变化等,转子本身结构不够稳定,也会导致信号突变。小波分析对于信号的去噪处理准确、快速,公式为:

$$Wf(x) = f(x)\psi(x) =$$

$$f(x) \left(s \frac{d\theta_s(x)}{dx} \right) = s \frac{d}{dx} (f(x)\theta_s(x)) \quad (14)$$

式中, θ 为平滑指数; s 为尺度。

利用小波函数对尺度函数进行平滑处理, 变为一阶导数, 那么脉冲波的峰值就是小波函数的突变阻抗点。

5 确定转子组故障位置

为了使检测更准确, 明确转子组两端的短路位置, 对发电机内各绕组之间的互相作用产生的影响忽略不计, 并固定发电机转子的位置与绕组参数, 形成一个被损坏的发电机转子组线路。当脉冲信号从两端进入, 逐渐传输到短路部位时, 短路行波会对其进行抵制, 而导致信号中断, 直接发生折射或反射, 从原路返回两点端转子组。假设脉冲信号不受行波的影响而到达短路故障位置, 短路行波阻抗为 Z_0 , 经时间差信号的变异阻抗为 Z_1 , 那么当信号 X_1 到达匝间短路故障区域时的过程见图 1。

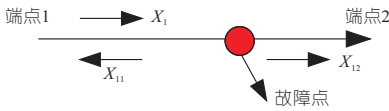


图 1 故障电波的反射和折射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflection and refraction of fault radio waves

过程中的行波通过介质进行折射后的 X_{11} 会消散一部分, 然后与经反射后的行波 X_{12} 形成时间差信号, 继续传播, 假设忽略空气中介质的影响, 行波的折射系数为 α 、反射系数为 β , 按系数变化来推测转子组两端短路行波变化, 其表达式为:

$$\begin{cases} \alpha = X_{11}/X_1 = (Z_1 - Z_0)/(Z_1 + Z_0) \\ \beta = X_{12}/X_1 = 2Z_1/(Z_1 + Z_0) \end{cases} \quad (15)$$

遇到反射后的行波会原路返回转子组端点, 此时反射波就会与初始反射波产生冲突, 两者相互融合, 增加转子组的压力, 破坏传输通道。由式 (15) 可知, 反射系数 β 会随变异阻抗 $Z_1 - Z_0$ 的变化而变化, 且呈正比例变化, 阻抗越大, 系数就越大, 检测到的短路故障点处的行波就越大。若要检测时的波形趋于稳定, 就可将聚集在故障区域的波形全部移动到线路分支, 此时阻抗 $Z_1 < Z_0$, 反射回到端点的波形与起始波形会相对分开, 从而使短路检测正常运行, 减少短路故障。

RSO 可同时检测多个转子组端点, 然后刺激两端发出高频信号, 使信号形成一个规律波形, 若信号的传输时间为 T , 信号经过每一个故障点就会显示出来, 波形中的峰值就是脉冲波检测到的短路位置, 也是两个端点之间第一个故障的位置。

6 试验分析

6.1 试验设备参数

为验证基于时间差计算的大型超临界发电机转子组 RSO 检测方法在实际应用中的效果, 进行现场试验。试验发电机见图 2。



图 2 大型超临界发电机组实物图

Fig. 2 Physical diagram of a large supercritical generator set

电机主要技术参数见表 1。

表 1 试验发电机的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameter of experimental generator

指标	单位	参数	指标	单位	参数
额定功率	kW	4	额定转速	r/min	1 500
额定电压	V	350	转子导条根数	根	30
额定电流	A	12			

6.2 试验过程和原理

试验过程主要是检测电机初始转子位置、启动时转子位置与断条故障, 转子检测场景见图 3。



图 3 转子 RSO 检测场景

Fig. 3 Rotor RSO detection scenario

RSO 检测试验原理见图 4。由图 4 可知, 试验时, 将 RSO 测试仪的两条测试线分别与转子绕组的正负极连接, 接地线与转子连接, 然后启动 RSO 测试仪。测试仪在转子正负两极各施加一个高频低压的脉冲信号(频率为 1 kHz、幅值为 12 V), 调整输出阻抗, 使测试仪阻抗与转子阻抗相同, 以使转子绕组获取最大功率。同时用示波器观察相应的输出响应信号。正常情况下, 由于转

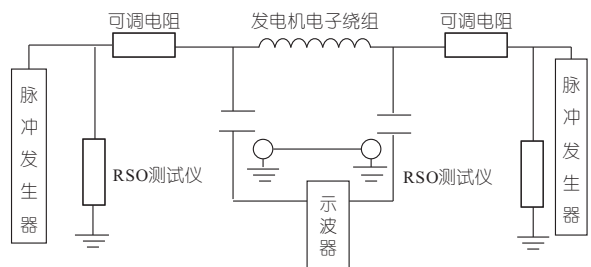


图 4 RSO 检测试验原理

Fig. 4 Experimental principle of RSO detection method

子绕组分布的对称性,正负两极的脉冲响应信号应完全一致。一旦不能完全重合,波形出现凸起,说明转子绕组绝缘存在异常,从而定位故障。

试验环境为 Win10 操作系统,英特尔 i5-9400F 处理器和 NVIDIA GeForce GTX1070 显卡。试验采用 Python 编程语言在 Tensorflow 深度学习框架上训练和测试检测模型。

6.3 试验结果对比

将本文试验结果与实际值进行对比,转子初始位置对比结果见图 5。由图 5 可知,在转子初始位置估计上,本文方法与实际值相差小于 0.3° ,验证了该检测方法的有效性。分析原因是本文方法能处理电流采样误差,所以降低了估计误差。

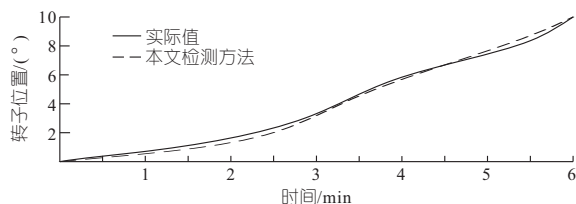


图 5 转子初始位置估计值与实际值对比

Fig. 5 Comparison of estimated initial rotor position with actual value

本文检测方法针对启动时转子位置的检测波形与实际波形对比结果见图 6。由图 6 可知,本文检测方法与实际波形相差小于 0.3° ,能获得准确的转子初始位置值,可保证电机顺利启动。

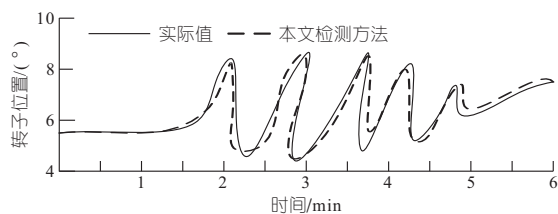


图 6 启动时转子位置与实际位置波形图

Fig. 6 Starting rotor position and actual position waveform diagram

发电机在转子正常与两根断条两种条件下电流的频谱对比结果见图 7。由图 7 可知,在转子

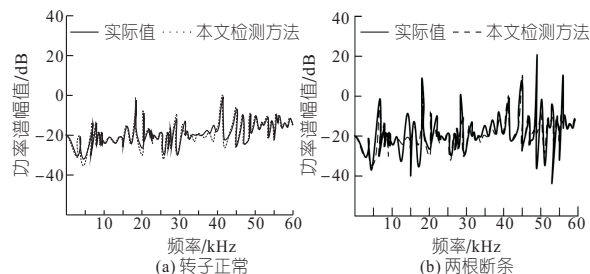


图 7 转子正常、两根断条时对比结果

Fig. 7 Comparing results when the rotor is normal and at two broken bars

正常、两根断条时,本文方法获得的功率谱幅值与实际值相差分别小于 5、13 dB,证明本文方法具有较好的检测效果。试验证明,本文检测方法在转子位置、断条故障检测上,均与实际值相差较小,证明了本文方法的有效性。本文方法获得的效果较好的原因是预先对脉冲信号时间差进行了处理,并构建了线圈短路检测模型,在检测初期就为后续检测提供了准备,从而提高了检测效果。

7 结论

a. 为了提高转子检测的准确性,提出时间差计算下的大型超临界发电机组转子组 RSO 检测方法,通过提取时间差脉冲信号特征,构建线圈短路检测模型,确定转子组故障位置,实现转子组的 RSO 检测。

b. 试验结果表明,本文检测方法的电机转子位置检测结果准确性较高,适用于检测转子组匝间短路状况,可快速、简便地发现线路异常。

参考文献:

- [1] 柴俊,江延宇,彭艳. 永磁同步电机脉振高频电压注入转子位置检测[J]. 控制工程,2020,181(1):145-149.
- [2] 赵佳怡,徐政,李光明,等. PMSM 转子初始位置分相注入检测法[J]. 电气传动,2020,373(11):5-8.
- [3] 张子良,胡存刚,张云雷. 一种改进的 PMSM 转子初始位置检测方法[J]. 电气传动,2020,365(3):14-17.
- [4] 吕彬,茅大钧. 基于模糊理论的 VSG 自适应转动惯量控制策略[J]. 水电能源科学,2020,38(5):147-150.
- [5] MA M, HOU Y, LI Y, et al. Analysis of rotor winding interturn short circuits affected by the initial dynamic eccentricity in large synchronous condensers[J]. IET electric power applications, 2022, 16(6):736-748.
- [6] ARIANBORNA M H, FAIZ J, GHODS M, et al. Analysis and detection of turn-to-turn short circuit fault in a permanent magnet Vernier generator based on modified winding function[J]. IET electric power applications, 2021,15(12):1630-1647.
- [7] SHAH S H, WANG X, AZEEM M, et al. Evaluation of magnetomotive force and torque ripples in modular type IPMSM with multi three-phase winding configurations[J]. IEEE access,2022,10:1577-1590.
- [8] TAKATSU K, OCHIAI M. Bolt tightening control method for 4P generator with solid-pole rotor[J]. Meiden review: international edition, 2020 (TN. 178):20-24.

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] 张悻宁,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