

故障诊断

# 基于MSET的汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断

黄杨森

(东方电气集团东方电机有限公司, 四川德阳 618000)

**摘要:**针对汽轮发电机转子绕组匝间短路故障,提出基于多元状态评估技术(MSET)的在线诊断方法。利用滑动窗口和欧氏距离构建状态矩阵,基于MSET构建励磁电流和无功功率计算模型,依据发电机运行状态运行值与计算值的相对偏差均值或残差均值构建匝间绕组短路故障在线诊断方法,并且使用某汽轮发电机运行数据进行验证。结果表明:所构建的在线诊断方法切实可行,满足了转子绕组匝间短路故障诊断应用需要,同时降低了故障误判的可能性。

**关键词:**转子绕组;匝间短路;励磁电流;无功功率;MSET

**中图分类号:**TM311

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-086X(2024)03-0182-07

**DOI:**10.19806/j.cnki.fdsb.2024.03.010

## Fault Diagnosis of Rotor Winding In-ter-turn Short Circuit in Turbine Generator Based on MSET

Huang Yangsen

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan Province, China)

**Abstract:** In order to solve the rotor winding in-ter-turn short circuit in a turbine generator, an online diagnosis method based on multivariate state estimation technique (MSET) was proposed. The state matrix was built by using sliding window and Euclidean distance. The exciting current and reactive power calculation models were constructed based on MSET. According to the average value of the relative deviation or residual value between the operating value and the calculated value of the generator, an online diagnosis method for rotor winding in-ter-turn short circuit fault was constructed, and the operation data of a steam turbine generator was used for verification. Results show that, the proposed online diagnosis method is feasible, which meets the requirements of rotor winding in-ter-turn short circuit fault diagnosis, and reduces the probability of fault misjudgment.

**Keywords:** rotor winding; in-ter-turn short circuit; exciting current; reactive power; MSET

近年来,随着汽轮发电机单机容量的增大及灵活性运行的需要,对发电机的励磁电流、无功功率的计算、监控、分析在发电机设计及故障诊断领域日显重要。根据GB/T 1029—2021《隐极三相同步电机试验方法》<sup>[1]</sup>,推荐保梯电抗法、美国标准协会(ASA)相量法、瑞典法等经典方法计算励磁电流,计算时需要使用定转子槽数、空载饱和曲线、短路特性曲线、保梯电抗、直轴电抗等

发电机设计和试验数据。但是,数据分析师很难掌握发电机设计试验知识,同时也往往缺乏上述设计试验数据,因此基于上述方法的转子绕组匝间短路故障诊断方法较难实现。

在转子励磁绕组发生匝间短路故障后,会出现励磁电流增大、无功功率减小的故障表征。针对该故障表征,李永刚等<sup>[2]</sup>提出了适用于在发电机过励运行状态和进相运行状态评判转子绕组

收稿日期:2023-07-05; 修回日期:2023-08-14

基金项目:东方电气集团东方电机有限公司科研项目(708-F-1905)

作者简介:黄杨森(1987—),男,高级工程师,主要从事电机智慧产品研发工作。

E-mail: huangyangsen@dongfang.com

匝间短路故障及其程度的判据(励磁电流计算值与运行值相对偏差);沈利平等<sup>[3]</sup>则提出将无功功率计算值与运行值的相对偏差作为评判转子绕组匝间短路故障及其程度的判据;向保录等<sup>[4]</sup>使用直流电阻法、交流电阻法、功率损耗法等3种方法对某300 MW 汽轮发电机转子绕组匝间短路试验及数据进行分析。

在智能诊断算法方面,逆向传播(BP)神经网络应用最为广泛。黄杨森<sup>[5]</sup>利用BP神经网络构建了转子振动预警方法识别振动异常。针对匝间短路故障,李红连等<sup>[6-7]</sup>基于支持向量机(SVR)、粒子群优化-支持向量机(PSO-SVR)、BP神经网络、遗传规划(GP)等计算励磁电流,同时应用励磁电流计算值与运行值的相对偏差评判匝间短路故障及其程度。徐俊元等<sup>[8]</sup>基于栈式自编码神经网络-长短周期记忆(SAE-LSTM)单元循环神经网络计算励磁电流,并利用励磁电流计算值与运行值的残差均值和标准差实现转子绕组匝间短路预警。总体而言,当前的匝间短路智能诊断方法普遍采用模拟匝间短路故障试验数据进行验证,而真机故障数据测试不足。

在故障预警与诊断领域,多元状态评估技术(MSET)应用极为广泛。郭鹏等<sup>[9]</sup>基于MSET对风电机组塔架振动进行建模研究;尹艳松<sup>[10]</sup>基于MSET对高速列车轴承温度进行了预测研究;黄杨森等<sup>[11]</sup>在总结转子振动运行规律基础上基于MSET构建转子振动预警方法。在转子绕组匝间短路故障诊断领域应用MSET的研究较少,主要原因为:(1)缺乏故障前后长期运行数据;(2)MSET状态矩阵选取困难,需要涵盖尽可能多运行工况且避免数据量过大;(3)需要进一步验证励磁电流、无功功率的计算值与运行值的相对偏差判据是否适用于汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断。

为解决上述问题,笔者利用励磁电流增大、无功功率相对减小这一故障特征在线诊断转子绕组匝间短路。首先,提出状态矩阵构建方法,基于MSET方法计算励磁电流和无功功率;其次,针对励磁电流和无功功率相对偏差的不足,提出实用改进方法,从而构建出转子绕组匝间短路诊断方法;最后,使用某电厂汽轮发电机转子绕组匝间短路发生前后的长期运行数据进行测试分析,并与基于保梯电抗法和ASA相量法的对比,验证所构建诊断方法的可行性和准确性。

## 1 MSET 原理

为了不依赖电磁设计经验和设计试验参数,需要一种既能满足匝间短路故障诊断,又可以计算励磁电流和无功功率的方法,因此提出基于MSET的计算方法。

梳理保梯电抗法和ASA相量法等励磁电流计算方法所涉及的变量参数,其中影响励磁电流计算的参数包括:有功功率、无功功率、相电流、线电压、励磁电流、功率因数、电枢反应励磁电流、内电势对应励磁电流、短路励磁电流、气隙励磁电流等。机组正常运行时,能够确定给出发电机的励磁电流、有功功率和机端电压,进而可以计算得到该状态对应的无功功率标准值<sup>[3]</sup>。综合考虑参数之间的关系,计算励磁电流和无功功率的相关参数至少包括:有功功率 $x_1$ 、无功功率 $x_2$ 、相电流 $x_3$ 、线电压 $x_4$ 、励磁电流 $x_5$ 等。将上述参数组成向量 $\mathbf{X}_0$ 。

$$\mathbf{X}_0 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T \quad (1)$$

利用滑动窗口选取 $\mathbf{X}_0$ 的历史数据作为MSET状态矩阵。首先,确定 $t$ 时刻距滑动窗口的距离 $L$ ,即 $t$ 时刻与滑动窗口最后时刻的间隔距离。为评判匝间短路的准确性, $L$ 要尽可能大。 $t$ 时刻的状态矩阵为:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_0(t-L-n_0+1) \\ \vdots \\ \mathbf{X}_0(t-L-1) \\ \mathbf{X}_0(t-L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为 $t$ 时刻的MSET状态矩阵; $\mathbf{X}_0(t-L-n_0+1)$ 为 $\mathbf{X}_0$ 所有参数在 $t-L-n_0+1$ 时刻运行值构成的向量; $\mathbf{X}_0(t-L-1)$ 为 $\mathbf{X}_0$ 所有参数在 $t-L-1$ 时刻运行值构成的向量; $\mathbf{X}_0(t-L)$ 为 $\mathbf{X}_0$ 所有参数在 $t-L$ 时刻运行值构成的向量; $n_0$ 为滑动窗口状态矩阵数据量(即窗口大小预设值)。

由于矩阵 $\mathbf{D}$ 代表了发电机正常运行的动态过程,需要尽量包括所有正常运行工况数据,因此 $n_0$ 预设值一般较大, $\mathbf{D}$ 可能存在数据量过大的问题。匝间短路故障诊断不要求每时每刻都进行评判,但为提高MSET的计算速度,在归一化处理矩阵 $\mathbf{D}$ 后,可以使用林万德等<sup>[12]</sup>提出的数据处理简化方法,即当 $\mathbf{D}$ 内任意2组数据的欧氏距离小于设定阈值时就删除其中1组数据。

以 $t$ 时刻的运行数据向量或矩阵 $\mathbf{X}_0(t)$ 作为MSET的观测向量或矩阵 $\mathbf{X}_{\text{obs}}$ 。依据MSET方法,

代入  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{X}_{\text{obs}}$ , 可求出模型的估计向量或矩阵  $\mathbf{X}_{\text{est}}$ 。

$$\mathbf{X}_{\text{est}} = \mathbf{D} \cdot (\mathbf{D}^T \otimes \mathbf{D})^{-1} \cdot (\mathbf{D}^T \otimes \mathbf{X}_{\text{obs}}) \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{X}_{\text{est}}$  和  $\mathbf{X}_{\text{obs}}$  维度相同;  $\otimes$  表示计算 2 个向量或矩阵的欧氏距离。

$$Q(t) = \mathbf{X}_{\text{est}}(2) \quad (4)$$

$$I_f(t) = \mathbf{X}_{\text{est}}(5) \quad (5)$$

式中:  $Q(t)$ 、 $I_f(t)$  分别为  $t$  时刻无功功率和励磁电流计算值;  $\mathbf{X}_{\text{est}}(2)$ 、 $\mathbf{X}_{\text{est}}(5)$  分别为列向量或矩阵  $\mathbf{X}_{\text{est}}$  的第 2 行和第 5 行。

## 2 匝间短路诊断方法设计

在汽轮发电机实际运行情况下, 直接使用励磁电流或无功功率的相对偏差评判匝间短路及其故障程度缺乏可行性, 主要存在以下原因:

(1) 在转子绕组匝间短路前后, 相对偏差分布范围重叠, 容易引起误判; (2) 励磁电流或无功功率的计算值和运行值均存在不确定因素和随机干扰; (3) 匝间短路故障发生后, 长时间看故障程度趋势随运行时间的增长逐渐恶化, 但短时间看随运行时间的推移故障程度会有反复, 容易引起误判。为克服上述缺点, 在基于滑动窗口原理和欧氏距离精简数据方法选取状态矩阵的基础上, 通过计算滑动窗口内励磁电流相对偏差均值或无功功率残差均值评判匝间短路及其故障程度, 进一步提高可靠性。励磁电流计算值与运行值的相对偏差, 以及无功功率运行值与计算值残差的计算公式分别为:

$$\epsilon = \frac{x_5(t) - I_f(t)}{x_5(t)} \quad (6)$$

$$\eta = x_2(t) - Q(t) \quad (7)$$

式中:  $\epsilon$  为励磁电流相对偏差;  $\eta$  为无功功率残差;  $x_5(t)$ 、 $x_2(t)$  分别为  $t$  时刻励磁电流和无功功率运行值。

根据式(6)和(7)得到矩阵:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_2 & \cdots & \epsilon_k & \cdots & \epsilon_t \\ \eta_1 & \eta_2 & \cdots & \eta_k & \cdots & \eta_t \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{E}$  为励磁电流相对偏差和无功功率残差组成的矩阵;  $k$  为滑动窗口每个窗口的数据量,  $\epsilon_1 \sim \epsilon_k$  为 1 个窗口,  $\epsilon_2 \sim \epsilon_{k+1}$  为 1 个窗口, 以此类推;  $\epsilon_t$  为  $t$  时刻励磁电流相对偏差;  $\eta_t$  为  $t$  时刻无功功率残差。

某个窗口的励磁电流相对偏差均值和无功功率残差均值为:

$$p_1(j) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} \epsilon_j \quad (9)$$

$$p_2(j) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} \eta_j \quad (10)$$

式中:  $p_1(j)$  为励磁电流相对偏差均值;  $p_2(j)$  为无功功率残差均值。

利用线电压  $x_4 > 80\% U_N$  (额定电压) 剔除启停机过程及停机状态的非运行状态数据, 再结合 MSET 方法、2 种匝间短路判据 (励磁电流相对偏差均值和无功功率残差均值), 构建汽轮发电机转子绕组匝间短路在线诊断方法 (见图 1)。该匝间短路诊断方法既可以通过励磁电流相对偏差均值评判匝间短路, 又可以利用无功功率残差均值评判匝间短路, 进一步降低了单一特征误判概率。

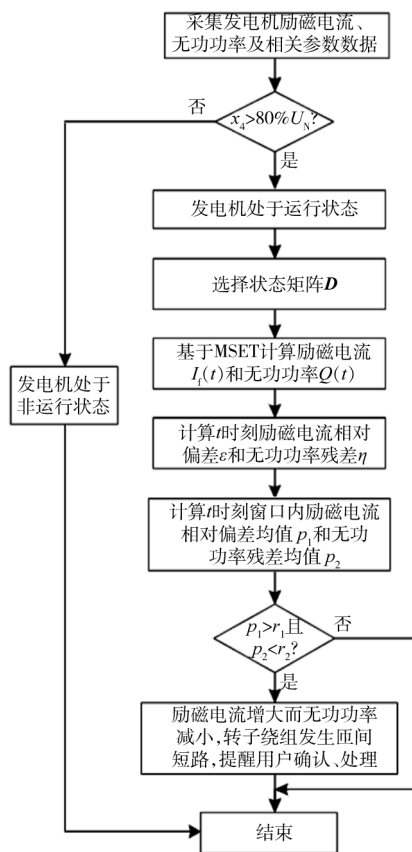


图 1 转子绕组匝间短路诊断方法

匝间短路故障前后, 励磁电流相对偏差均值会发生明显变化。当  $p_1 > r_1$  (阈值  $r_1$  可以根据较长时间无匝间短路发生的  $p_1$  统计最大值设定或根据相同机型匝间短路故障数据计算  $p_1$  设定,  $r_1$  也可以取多级阈值) 时, 转子绕组发生匝间短路故障,  $p_1$  越大, 匝间短路越严重。同理计算无功功率残差均值  $p_2$ , 当  $p_2 < r_2$  (阈值  $r_2$  与阈值  $r_1$  设定方式类似) 时, 转子绕组发生匝间短路故障,  $p_2$  越小, 匝间短路越严重。

3 数据测试

在智慧化电厂建设时,从厂级实时监控信息系统(SIS)中获取 1 000 MW 汽轮发电机(型号为 QFSN-1000-2-27)部分历史运行数据(采集频率为 6 s)用于上述转子绕组匝间短路诊断方法测试。同时,使用保梯电抗法和 ASA 相量法计算励磁电流进行对比分析。

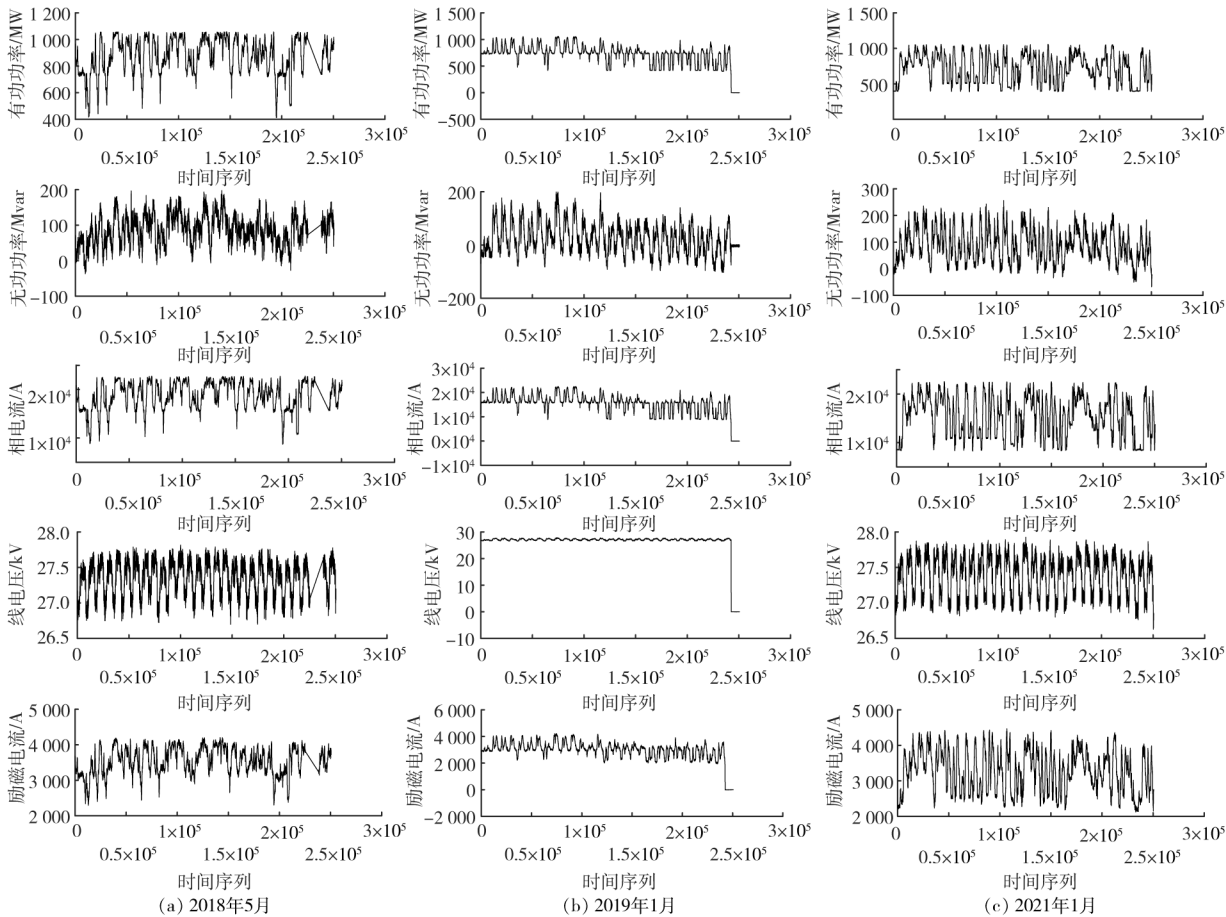
3.1 汽轮发电机设计、试验和运行数据

1 000 MW 汽轮发电机部分电气、结构、试验基本参数数据见表 1,该数据主要用于保梯电抗

法和 ASA 相量法计算励磁电流。该汽轮发电机 2018 年 5 月、2019 年 1 月、2021 年 1 月、2022 年 1 月和 6 月的部分原始运行数据(含有功功率、无功功率、相电流、线电压、励磁电流等数据)见图 2。保留线电压大于 21.6 kV(剔除启停机过程及停机状态无用数据)的数据用于匝间短路诊断方法测试验证。经确认,2018 年 5 月、2019 年 1 月均为未发生转子绕组匝间短路的正常运行数据,2021 年 1 月、2022 年 1 月和 6 月的数据为已发生匝间短路故障的运行数据。

表 1 发电机基本参数

参数	数值	参数	数值	转子线圈参数	数值	定子线圈参数	数值
额定功率 $P_N$ /MW	1 008 (1 120 MV·A)	额定氢压 $p_H$ /MPa	0.52	槽数 $Z_2$	32	每槽导体数 $S_{n1}$	2
最大连续功率 $P_{max}$ /MW	1 100 (1 230 MV·A)	相数 $m$	3	深槽数 $Z_2$ -H	28	定子槽数 $Z_1$	36
额定电压 $U_N$ /V	27 000	接法	YY	浅槽数 $Z_2$ -L	4	极距 $\tau$ /槽	18
额定电流 $I_N$ /A	23 949	绝缘等级	F 级	深槽匝数 $S_{n2}$ -H	7	短距 $y_1$ /槽	15
额定功率因数 $\cos \varphi_N$	0.9(滞后)	额定励磁电流 $I_{fN}$ /A	5 272	浅槽匝数 $S_{n2}$ -L	4	并联支路数 $\alpha$	2
额定频率 $f_N$ /Hz	50	额定励磁电压 $U_{fN}$ /V	501	极对数 $p$	1	每相每极槽数 $q$	6
额定转速 $n_N$ /(r·min <sup>-1</sup> )	3 000	直轴电抗 $X_d$ /%	217	转子槽距角 $\alpha_2$ /(°)	7.73	电角度 $\alpha_1$ /rad	0.174 44
保梯电抗 $X_p$ /Ω	0.165 9			槽分度数 $Z_2'$	46.55		





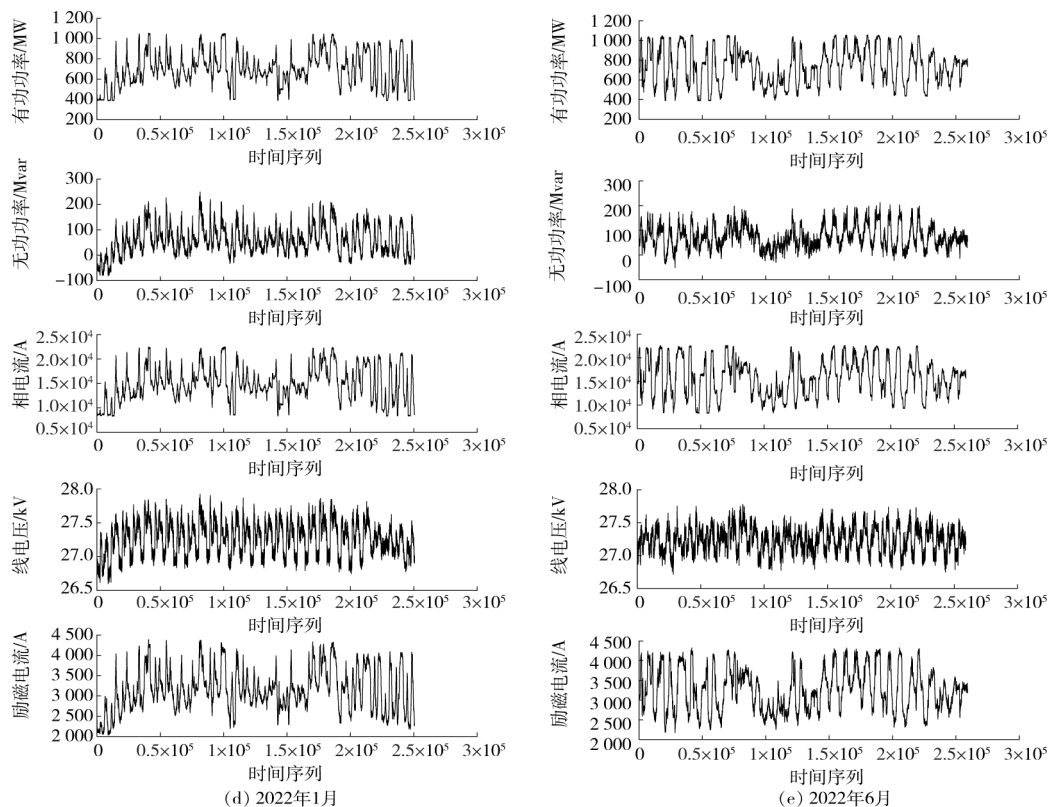


图 2 1 000 MW 汽轮发电机运行数据

### 3.2 转子绕组匝间短路诊断方法测试

在选择 MSET 状态矩阵时,需要包含尽可能多的正常工况数据,同时选择各参数(有功功率、无功功率、相电流、线电压、励磁电流)运行范围广且分布均匀的时段内数据,因此选用 2019 年 1

月的数据作为状态矩阵。MSET 计算励磁电流结果见图 3。励磁电流运行值、计算值分别见图 3(a)、(b)。基于 MSET、保梯电抗法、ASA 相量法的励磁电流相对偏差分布情况分别见图 3(c)和图 4,相对偏差范围及均值统计见表 2。

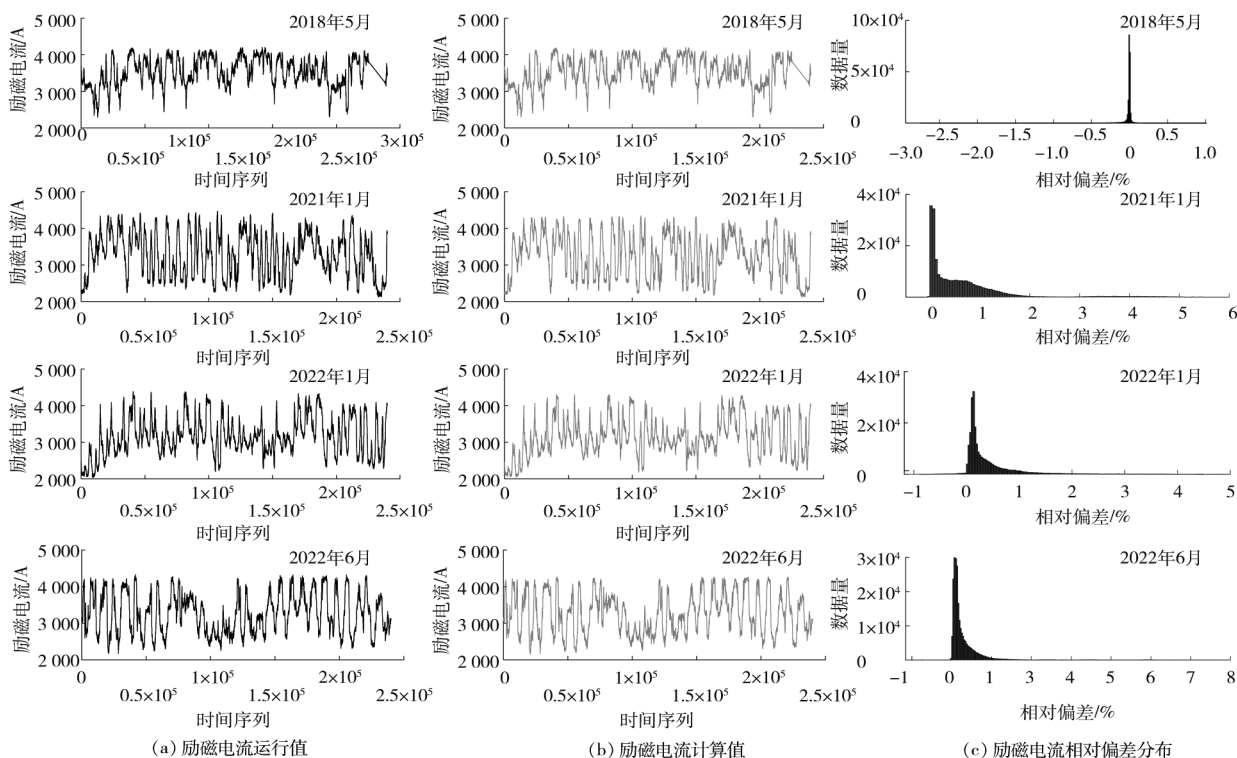


图 3 基于 MSET 的励磁电流运行值、计算值及相对偏差分布

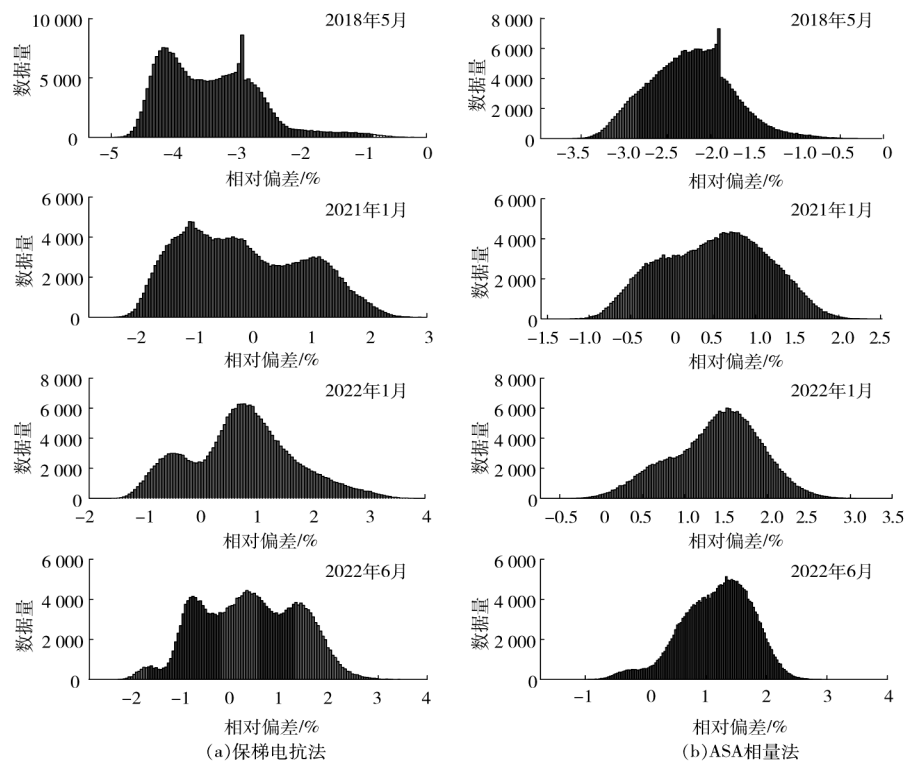


图 4 基于保梯电抗法和 ASA 相量法的励磁电流相对偏差分布

表 2 励磁电流相对偏差统计

日期	励磁电流相对偏差/%			励磁电流相对偏差均值/%		
	保梯电抗法	ASA 相量法	MSET	保梯电抗法	ASA 相量法	MSET
2018 年 5 月	-5.09~0.02	-3.75~-0.07	-2.75~1.09	-3.41	-2.23	-0.06
2021 年 1 月	-2.57~3.00	-1.36~2.50	-0.13~6.44	-0.19	0.51	0.64
2022 年 1 月	-1.72~4.11	-0.51~3.31	-0.89~4.64	0.73	1.38	0.39
2022 年 6 月	-2.51~4.12	-1.47~3.98	-0.73~7.27	0.37	1.17	0.33

根据表 2 数据绘制基于保梯电抗法、ASA 相量法、MSET 的励磁电流相对偏差均值曲线(见图 5)。由图 3—图 5、表 2 可知:根据 2019 年 1 月数据选取状态矩阵时,由 MSET 反向评估 2018 年 5 月的相对偏差均值为负值,励磁电流略微减小,表明 2019 年 1 月励磁电流有略微增大趋势;在 3 种方法中,基于 ASA 相量法的励磁电流相对偏差整体范围最小,基于 MSET 的励磁电流相对偏差主要范围最小且分布最优;匝间短路前后,基于 3 种方法的励磁电流相对偏差范围整体向右移动且范围之间均存在重叠(重叠容易引起误判),相对偏差均值明显增大,励磁电流呈现增大趋势。

研究结果表明:在合理选择状态矩阵的情况下,采用不依赖发电机设计和试验参数数据的

MSET 计算励磁电流切实可行;通过滑动窗口励磁电流相对偏差均值可以准确判断转子绕组匝间短路故障及其程度。

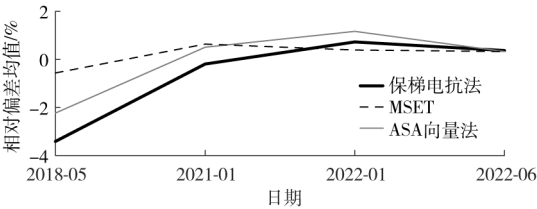


图 5 励磁电流相对偏差均值

基于 MSET 计算励磁电流同时计算无功功率,以 2019 年 1 月数据为状态矩阵时,无功功率运行值、计算值及残差分布情况如图 6 所示。无功功率运行值与计算值残差范围及均值统计见表 3。

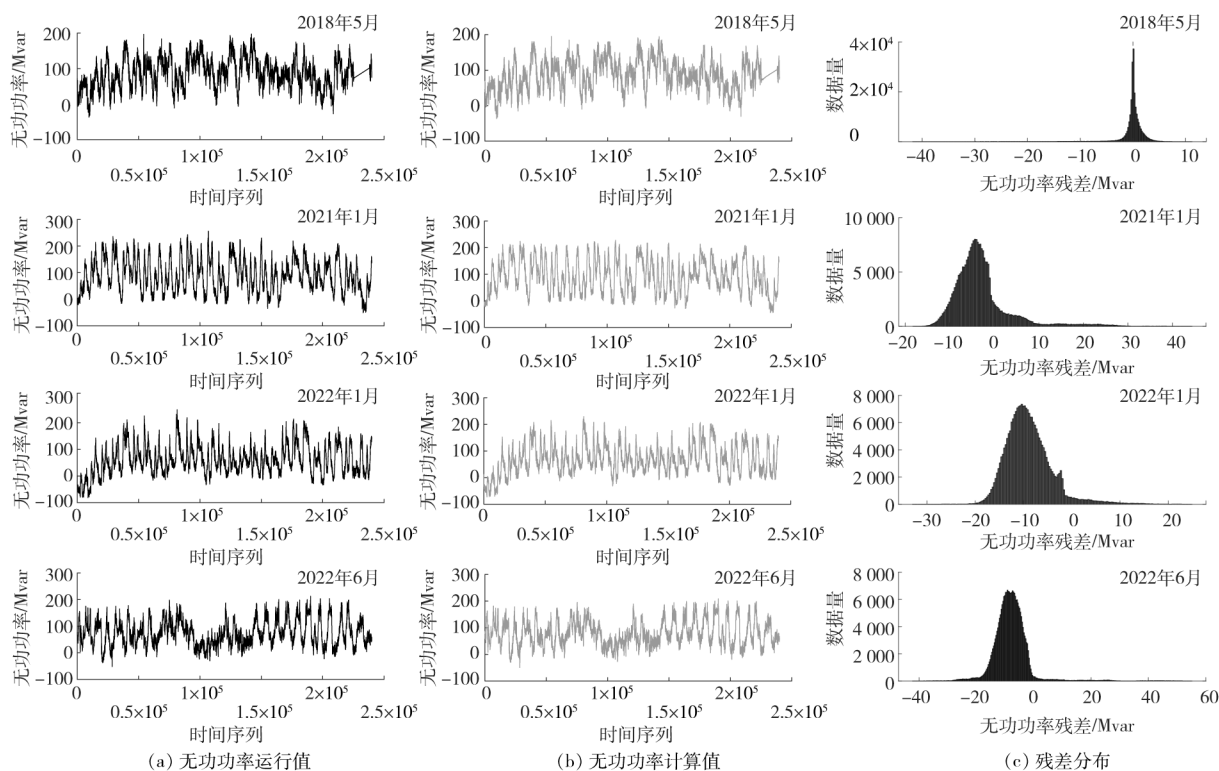


图 6 无功功率运行值、计算值及残差分布

表 3 无功功率残差统计

日期	残差/Mvar	残差均值/Mvar
2018 年 5 月	-41.62~11.09	-0.35
2021 年 1 月	-18.05~44.13	-2.95
2022 年 1 月	-32.89~24.76	-8.91
2022 年 6 月	-42.24~54.96	-7.99

由图 6 和表 3 可知:根据 2019 年 1 月数据选取状态矩阵时,由 MSET 反向评估 2018 年 5 月的无功功率残差均值接近于零,无功功率略微减小,表明 2019 年 1 月无功功率有略微增大趋势;匝间短路前后,无功功率残差范围整体向左移动且范围之间均存在重叠,残差均值明显减小,无功功率呈现相对减小趋势。

关于无功功率的分析表明:无功功率残差均值在匝间短路前后均呈现明显减小趋势;在合理选择状态矩阵的情况下,采用不依赖发电机设计和试验参数数据的 MSET 计算无功功率切实可行;通过滑动窗口无功功率残差均值可以准确判断转子绕组匝间短路故障及其程度。

## 4 结语

为了在缺乏设计、试验参数数据条件下,实现汽轮发电机转子绕组匝间短路故障及其程度的评判,提出了基于滑动窗口和欧氏距离构建状

态矩阵的方法,使用 MSET 方法计算励磁电流和无功功率;利用滑动窗口励磁电流相对偏差均值或无功功率残差均值判断匝间短路故障及其程度;最后,使用大量机组实际运行数据进行测试验证分析。测试结果表明:相比于基于经典励磁电流计算方法的转子绕组匝间短路诊断方法,基于 MSET 的转子绕组匝间短路诊断方法切实可行,可以摆脱对发电机设计知识储备和制造厂设计试验参数的依赖。同时,融合 2 种或多种故障特征评判匝间短路故障及其程度,可以有效降低误判概率,提高转子绕组匝间短路在线诊断能力。研究结果可以为转子绕组匝间短路故障原因分析提供参考。

## 参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 三相同步电机试验方法: GB/T 1029—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 5.
- [2] 李永刚, 李和明, 赵华. 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 112-116, 169.
- [3] 沈利平, 马明哈, 李永清, 等. 基于无功相对偏差的无刷励磁发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 106-110, 117.
- [4] 向保录, 左国荣. 发电机转子匝间短路试验数据分析[J]. 发电设备, 2009, 23(4): 305-308.

正常状态。

通过上述排查工作,成功确定了振动异响的根源,并且提供了相应的处理意见和数据支持,为后续的技术改造工作提供了重要的指导。

## 4 结语

通过简易声源定位法对风力发电机组塔筒松动故障进行诊断,确定了振动异响的部位,这种方法在实际工程应用中具有很大的可行性和实用性。主要结论如下:

(1) 通过实际测量获得塔筒一阶固有频率,再将实测的塔筒一阶固有频率与仿真结果进行对比,可以确认塔筒运行情况与设计值是否一致或存在偏离。

(2) 机械波的冲击振动会产生异响,这些异响以声波形式在塔筒内通过空气传播。筒内的结构和空间可能引起声音的反射、吸收和折射,从而影响声音的传播路径和特性,无法直接定位异响源。为了确定振动源的方位,采用逐步在机械部件上放置传感器的方法,捕捉不同位置的信号,并且根据振动波形在时间域内的先后次序进行判断。

(3) 通过相位分析观察信号的时间差和相位差,可以确定信号的传播路径。声源定位原则利

用不同传感器之间的时间差和相位差来计算声源位置,能够更准确地确定振动信号的传播路径和问题根源位置,进而实施有针对性的故障诊断。

## 参考文献:

- [1] 霍涛,童乐为,郭志鑫,等. 风力机钢塔筒结构风致疲劳分析方法研究[J]. 工程力学, 2023, 40(8): 77-89.
- [2] 曾梦伟,魏克湘,李颖峰,等. 大型风力机塔架固有频率分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(4): 30-33.
- [3] 王佼姣,施刚,石永久,等. 考虑不同边界约束条件下的风电机组塔架固有频率分析[J]. 特种结构, 2011, 28(5): 5-8, 108.
- [4] 胡仕明. 1.5 MW 双馈型风电机组异常响声分析[J]. 风能, 2014(6): 88-91.
- [5] 谭祥军. 从这里学 NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [6] 丁问司,卿涛. 凿岩机瞬态冲击动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 1-8.
- [7] 郑红,王鹏,方智文,等. 便携式双通道振动故障诊断仪: CN200710120842.0[P]. 2008-02-06.
- [8] 陈文戈,曾焕浪,李铭才,等. 便携式振动信号采集处理系统的研究与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2000(1): 20-23.
- [9] 郝建民. 采样定理与奈奎斯特准则的研究[J]. 遥测遥控, 1998(2): 12-20.
- [10] 赵转,李世强,刘志芳. 冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6): 84-89.
- [5] 林琳,郑坊平,侯召堂,等. 超超临界锅炉高温再热器管横向裂纹分析[J]. 铸造技术, 2017, 38(11): 2657-2660.
- [6] 冯砚厅,郑相锋,李中伟. 再热器联箱管接头失效分析[J]. 热加工工艺, 2008, 37(19): 130-131.
- [7] 师瑞霞. 12Cr1MoV 合金金元素作用及基体性质的研究[D]. 兰州: 甘肃工业大学, 2001.
- [8] 唐爱晖. 12Cr1MoV 主蒸汽管道材质损伤分析与寿命评估[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- [9] 国家能源局. 火力发电厂金属技术监督规程: DL/T 438—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高压锅炉用无缝钢管: GB/T 5310—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 刘凯. 转向架侧梁磁控高速 GMAW 焊接应力与变形的有限元分析[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [12] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] 董森. 焊接残余应力对结构极限强度影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [14] 国家能源局. 火力发电厂焊接技术规程: DL/T 869—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [15] 国家能源局. 火力发电厂焊接热处理技术规程: DL/T 819—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] 黄杨森. 基于 BP 神经网络的转子振动预警方法研究[J]. 发电设备, 2023, 37(3): 186-191.
- [6] 李红连,唐炬. 基于 PSO-SVR 的同步发电机励磁电流预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 188-194.
- [7] 李红连,唐炬,方红,等. 基于支持向量回归机的同步发电机励磁电流预测方法[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 274-276, 302.
- [8] 徐俊元,梁辰,何天磊,等. 基于 DCS 系统数据驱动的汽轮发电机转子绕组匝间短路缺陷检测[J]. 大电机技术, 2021(6): 15-21, 27.
- [9] 郭鹏,徐明,白楠,等. 基于 SCADA 运行数据的风电机组塔架振动建模与监测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 128-135.
- [10] 尹艳松. 基于 NSET 模型的高速列车轴温预测方法[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(12): 26-27, 30.
- [11] 黄杨森,刘云平,王勇,等. 汽轮发电机组转子振动预警方法研究[J]. 机械强度, 2023, 45(3): 541-547.
- [12] 林万德,刘雄,黄杨森,等. 一种工况参数的预测方法、装置、设备及存储介质: 113821934A[P]. 2021-12-21.