

# 编制说明

(发电机转子交流阻抗测试仪校准规范)

《发电机转子交流阻抗测试仪》校准规范编写组

2022年4月

## 一、编制规范的必要性

近年来煤电、风电产业快速发展，发电厂数量迅速增加；发电机转子交流阻抗测试仪作为电厂必备的仪器设备，其数量随之快速增加，与之相应发电机转子交流阻抗测试仪的检定、校准技术服务需求也快速增加。然而，目前国内尚无专门针对该类仪器设备进行检定、校准的标准器，也没有有效的技术文件供计量技术机构参照以进行检定和校准工作。因此，与发电机转子交流阻抗测试仪相关的校准技术服务需求问题目前还无法有效解决，相应的量值溯源工作也存在一定的困难。在此背景下，迫切需要制定相关的校准规范。

基于以上分析，我们提出《发电机转子交流阻抗测试仪校准规范起草》项目，以解决上述实际问题。本项目中，将制定相关的校准规范，将有效解决发电机转子交流阻抗测试仪的校准技术服务需求问题，促进相关领域量值溯源工作的顺利开展，为煤电、风电企业的顺利运营提供技术支持。

## 二、编制依据

JJF1001 《通用计量术语及定义》

JJF1071 《国家计量校准规范编写规则》

JJG1052—2009 《回路电阻测试仪、直阻仪检定规程》

JJF1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》

JJG 124-2005 《电压表、电流表、功率表及电阻表》

JJF 1491-2014 《数字式交流电参数测量仪校准规范》

GB/T13978-2008 数字多用表

## 三、工作原理

发电机交流阻抗测量方法主要有电桥法、谐振法和伏安法等。电桥法具有较高的测量精度，是常用的高精度测量方法，其缺点在于需要进行反复电桥平衡调节，测量时间长，很难实现快速自动测量。谐振法要求有较高频率的激励信号，一般不容易满足高精度测量的要求，由于测试频率不固定，测试速度也很难提高。伏安法是最经典的阻抗测量方法，测量原理基于欧姆定律，即阻抗 $Z_x$ 可以表述为：

$$Z_x = \frac{\dot{U}_x}{\dot{I}_x} = \frac{\sqrt{2}U_x e^{j\varphi}}{\sqrt{2}I_x e^{j\gamma}} = \frac{U_x}{I_x} e^{j\theta} \quad (3-1)$$

式中  $U_x$  —— 阻抗  $Z_x$  两端压降  $\dot{U}_x$  的有效值；

$I_x$  —— 流过阻抗  $Z_x$  电流  $\dot{I}_x$  有效值；

$\varphi$  —— 压降的初始相角；

$\gamma$  —— 电流的初始相角；

$\theta$  —— 电压与电流的初始相位差。

根据式(3-1)可得：

$$\begin{aligned} Z_x &= \|Z_x\| e^{j\theta} = \|Z_x\| \cos \theta + j \|Z_x\| \sin \theta \\ \|Z_x\| &= \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{U_R} R \end{aligned} \quad (3-2)$$

式中  $U_R$  —— 伏安法测量系统中标准阻抗上的压降。

显然要实现伏安法，仪器必须能进行矢量测量及除法运算。传统测量方案分为固定轴法和自由轴法，固定轴法的缺点在于为了固定坐标轴，确保参考信号与被测信号之间的精确相位关系，硬件电路要付出相当大的代价。自由轴法无需固定坐标轴，相敏检波器的相位参考基准可以任意选择，近年来智能阻抗测试仪大都选用此设计方案。如图3.1所示，自由轴法关键在于产生精确  $90^\circ$  相位差的相敏检波器基准信号，以得到待测阻抗电压  $\dot{U}_x$  和标准阻抗电压  $\dot{U}_R$  在直角坐标轴上的两个投影分量，其缺点是硬件相敏检波器直接影响测量精度。为了避免此缺点，系统采用虚拟仪器技术改进自由轴法，简化硬件电路，以软件相关算法准确测量  $\dot{U}_x$  和  $\dot{U}_R$  矢量，提高测量精度。由式(3-2)，通过相关算法检测有效值  $\dot{U}_x$ 、 $\dot{U}_R$  及相位差  $\theta$  就可以测量被测阻抗的虚实分量。

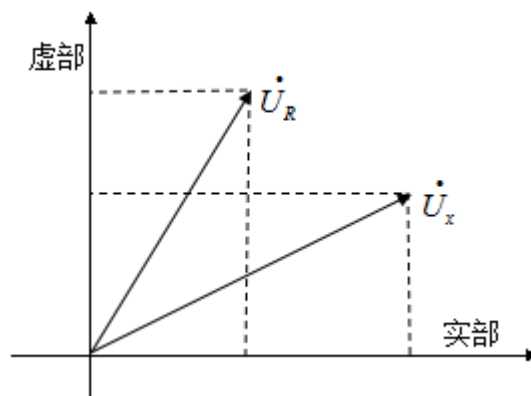


图3.1 伏安法矢量图

实际测量中交流阻抗指某一频率下的电压相量与电流相量之比，也可以用幅值和相角表示该频率的阻抗值，具体用Bode图表示在整个频率范围内交流阻抗的幅频特性和相频特性交流阻抗测量的基本原理如图3.2所示。

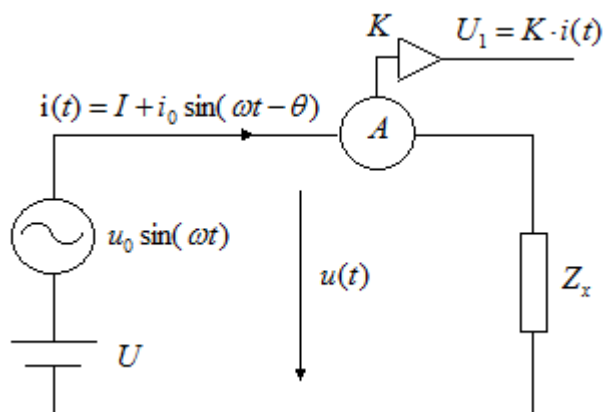


图3.2伏安法测量

在交流阻抗测量过程中，直流电源  $U$  建立系统的直流工作点  $I$ ，采用标准的交流激励电压提供小幅的正弦交流信号  $u_0 \sin(\omega t)$ ：

$$u(t) = U + u_0 \sin(\omega t) \quad (3-3)$$

式中  $u(t)$  —— 被测阻抗两端的电压；

$U$  —— 激励的直流电压；

$u_0$  —— 激励交流电压的幅值；

$\omega$  —— 激励交流电压的角速率。

通过测量得到流过被测阻抗的电流相量

$$i(t) = I + i_0 \sin(\omega t - \theta)$$

(3-4)

式中  $i(t)$  —— 流经被测阻抗的电流；

$I$  —— 流经被测阻抗的直流电流；

$i_0 \sin(\omega t - \theta)$  —— 流经被测阻抗的交流电流。

由欧姆定律可知，交流电压与交流电流的比值即为被测交流阻抗

$$Z_x = \frac{u_0}{i_0} \angle \theta \quad (3-5)$$

式中  $Z_x$  —— 被测交流阻抗值；

$\frac{u_0}{i_0}$ ——被测交流阻抗的幅值；

$\theta$ ——被测交流阻抗的相角。

一般，整个扫频测量过程中激励交流电压保持不变，当被测阻抗较大时，或者容性阻抗测量频率降低时，或者感性阻抗测量频率升高时，流过被测阻抗的待测交流电流幅值将更加微弱，必须利用交流放大电路转换成幅值较大的交流电压信号才能进行测量，被测的阻抗越大，流经被测阻抗的电流值越小，交流放大电路的放大倍数越高，电路的噪声也越大，测量更加困难。因此，精确测量交流小电流是交流阻抗测量的关键。

#### 四、规范编制的主要技术关注点

发电机转子交流阻抗测试仪校验装置主要用于对于发电机绝缘故障判断的准确性和可靠性问题。判断转子绕组匝间短路的方法有测量绕组直流电阻、录制发电机空载及短路特性曲线、测量绕交流阻抗等方法。前两种方法灵敏度比较低，效果并不明显。而测量交流阻抗则是一种比较灵敏的方法，当绕组中存在匝间短路时，在交流电压作用下流经短路线圈中的短路电流要比正常电流大许多，而该短路电流有强烈的去磁作用，即使在短路匝数很少时效果也十分明显。因此，通过对转子绕组中每个磁极交流阻抗值的相互比较，或与以前测量值相比较，判断绕组是否存在匝间短路现象。

转子绕组磁极交流阻抗的测量结果受诸多因素的影响，主要因素有磁极是否挂装、磁极是否已连接、试验电压的高低、转子在定子膛内或膛外、定子与转子间气隙的大小、磁极加垫厚度的影响等。只有将这些外部影响因素综合考虑，才能正确判断转子绕组测量结果是否正确，因为在上述不同条件下，所测得到的结果均不相同，相互差别也较大。不同厂家的测试仪器质量参差不齐，鉴于这样的现状，试验人员提出相关问题，主要包括：测量方法和测量结果的可靠性、测量结果的准确度。

#### 五、校准项目说明

本规范以发电机转子交流阻抗测试仪为主要研究对象，依据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编制对其量值溯源体系开展研究。

发电机转子交流阻抗测试仪校验装置进行测试后，编制相应的校验规范，对

大范围开展交流阻抗测试仪校验提供依据。

发电机转子交流阻抗测试仪校验装置主要技术参数：

交流阻抗：0~100 欧，0.1 级；

交流电压：0~500V，0.1 级；

交流电流：0~100A，0.1 级；

有功功率：0~50kW，0.2 级；

频率：45 Hz ~75Hz，0.1 级。

该规范经反复修改和试验，现已完成初稿的有关工作，由于水平有限，该规范中还存在不少问题，希望与会专家多提宝贵意见。