

# 低速永磁同步风力发电机试验 对变频测试的要求

何源<sup>1</sup>, 李庆莲<sup>2</sup>

(1. 长沙电机厂有限责任公司 湖南 长沙, 410000;

2. 湘潭电机股份有限公司 湖南 湘潭, 411100)

**摘要:** 对直驱永磁同步风力发电机试验系统的构成原理进行了简要阐述, 从电机试验报告出发, 结合相关国家标准, 提出电量测试设备的要求; 分析常用测试设备的技术指标, 提出了构建电量试验系统时的注意事项。

**关键词:** 永磁同步风力发电机试验系统; 变频测试; 技术指标;

## The Requirements of Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Wind Generator to The Frequency Conversion Test

He Yuan<sup>1</sup>, Li Qing-lian<sup>2</sup>

(1. Changsha Electric CO.,LTD , Hunan Changsha 410000;

2. XEMC, Hunan Xiangtan 411100)

**Abstract:** Make a simple explain to direct driving for permanent magnet synchronous wind generator test system's composition, from the test report for the motor and combine with national standards, put forward the requirements of power test equipment; analyse the technology index of common testing equipment, put forward the notice of the construction of power test system.

**Key words:** The permanent magnet synchronous wind generator test system; frequency conversion test; technology index;

### 0 引言

直驱永磁同步风力发电机具有永磁体励磁, 减小了励磁损耗, 无需从电网吸收无功; 直接驱动无需齿轮箱, 运行转速低, 效率高, 可靠性高等优点。逐渐成为电机厂的研究热点并得以快速的发展。目前国内大多电机厂尚处于研究和试验阶段。2006年, 国内首台 2MW 直驱永磁同步风力发电机在湘潭电机厂下线, 2009年, 由湘潭电机为主起草的《风力发电机组 低速永磁同步发电机 第 2 部分 试验方法》(以下简称《试验方法》)正式颁布。本文简要阐述了直驱永磁同步风力发电机试验系

布。然而, 由于直驱永磁同步风力发电机试验系统涉及多学科技术, 一般电机厂的技术人员很难对试验系统的构建提出合理的、完整的技术要求, 一般的试验站承建商也不能准确理解国家标准对试验设备的要求。一般一个试验站建设前期需要半年甚至一年以上的相关技术调研。而且, 基于工频测试技术的成熟性和用户对变频技术知识的普遍缺乏, 用户往往重点关注试验站中造价最高的变频器, 而忽视了决定试验站成败的测试系统。系统的构成原理, 对决定试验系统成败的关键技术指标进

行了分析，旨在对电机企业的试验站建设起到帮助作用。

本文中数据来源均取自湘潭电机股份有限公司的《TFY2000-3NT 低速永磁风力发电机型式试验报告》(以下简称《报告》)。该电机的主要技术参数如下：

额定功率：2180kW；额定电压：690V；额定电流：1833.4A；额定频率：8.5Hz；相数：2×3 相。

其试验系统的变频器的载波频率为 2kHz。

## 1 试验项目

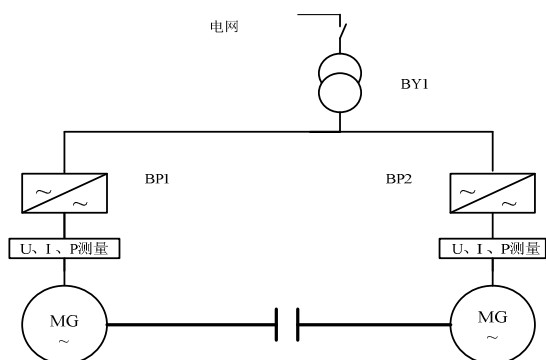
按照《试验方法》要求，主要有以下试验项目：

冷热态绝缘电阻测定、绕组冷态直流电阻测定、振动测量、噪声测量、匝间冲击耐电压、工频耐电压、启动阻力矩的测定、空载特性试验、稳态短路试验、突然短路试验、过载试验、超速试验、热试验、效率的测定、发电机额定电压调整率的测定、发电机功率特性试验、波形畸变率测定。

## 2 试验原理

冷热态绝缘电阻测定、绕组冷态直流电阻测定、振动测量、噪声测量、匝间冲击耐电压、工频耐电压、启动阻力矩的测定等项目按照标准进行，本文不再重复。

其余项目的试验系统原理图如下图所示。



系统包括拖动系统、被试电机、并网变频器、测试设备等。拖动系统包括拖动变频器、拖动电机。电网经

变压器 BY1 变为 690V 电压给拖动变频器 BP1 供电，拖动电机 MG1 在拖动变频器 BP1 的控制下作电动机运行，拖动被试电机 MG2 旋转发电。MG2 发出的电能经 4 象限变频器整流逆变为 50Hz/690V 的交流电，回馈交流母线。即发电机发出的电能提供给电动机使用，固变压器 BY1 只需补充两台电机的损耗即可，其从电网吸收的有功功率为两台电机及变频器的总损耗。

空载试验和超速试验均包含电动机法和发电机法两种方法，若采用发电机法，采用上述原理图线路连接。若采用电动机法，脱开联轴器，变频器 BY2 为被试电机 MG2 供电，MG2 作电动机单机运行。其它试验均工作在发电机状态，采用上述原理图接线试验。

直驱永磁同步风力发电机的转速低，拖动机可选低速电机或普通电机增加齿轮箱降速。增加齿轮箱后，增加了系统复杂性，齿轮箱的损耗给系统损耗分析增大了难度。而低速大功率电机通常不易采购。为简化系统，可采用同型号电机作为拖动机。两台变频器均采用 ABB 公司的 4 象限变频器。

图中“U、I、P 测量”为宽频带功率测试系统。

## 3 对测试设备的一般要求

### 3.1 精度指标

《试验方法》中 4.2 测量仪器仪表要求：

测量所用仪器仪表应满足以下要求：

a) 试验中使用的测量仪器、仪表、传感器均应经计量部门检定合格并在有效期内；

b) 试验时采用的电气测量仪表的准确度应不低于 0.5 级（兆欧表除外），电量传感器的准确度应不低于 0.2 级，电量变送器的准确度应不低于 0.5 级，转速表的准确度应不低于 1.0 级，测力计的准确度应不低于 1.0 级（悬挂式弹簧秤除外），温度计的误差应为  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，其

它测量仪器、仪表应符合相关标准的规定；

c) 用变流器做试验电源时，变流器输入端、输出端应采用宽频数字式测量仪，且在被测频率范围内满足精度要求。

### 3.2 电压测量量为基波有效值

《试验方法》指出，“电参数测量应采用宽频数字式测量仪，电压测量量为基波有效值，电流测量量为全有效值电流，功率测量量为全有效值功率”。

由于校准平均值 (MEAN) 在理论上等于正弦波的真有效值，且等于正弦调制 PWM 波形的基波有效值，且实现简单；因此，MEAN 在许多仪器仪表中用于替代正弦波的真有效值 (RMS) 或 PWM 的基波有效值 (H01) 的测量。

但是，近年来，变频调速技术日新月异，非正弦调制 PWM 的应用越来越多，而且，变频器用户通常并不了解自己的变频器采用何种调制模式，MEAN 值在 PWM 测量中局限性越来越大。

### 3.3 带宽的要求

《GB755-2003 旋转电机确定损耗和效率的方法》指出，“对于 PWM 变频器，必须使用宽频段的设备，优先使用带 AD 变换器和数字式数字处理机的电子式仪表”，同时，指出其频率范围应大于最大开关频率的 10 倍。本试验系统采用的变频器开关频率为 2kHz，固测试设备及传感器的带宽应该大于 20kHz。

《变频器供电三相笼型感应电动机试验方法》指出：对常用的指示仪表，其准确度是对标称频率规定的（如对 50 Hz~60 Hz），而在其规定的上限频率，其准确度等级容许有附加误差（如在 1 000 Hz 时为 0.4%）。电子式测量仪表通常均给出频率范围，指规定的上限频率，所规定的准确度既适用于 50 Hz 或 60 Hz，也适用

于规定的上限频率。

### 3.4 保证精度的幅值范围

《GB1032-2005 三相异步电动机试验方法》中指出，“因为大多数仪器的准确度等级通常以满量程的百分数表示，因此，应尽量按实际读数的需要，选择低量程仪表”。

为实现信号在宽范围内的高精度测试，实际试验中，一般根据信号的动态范围采用多个不同量程的传感器，通过开关换挡实现信号的宽范围高精度测试。这种方式的缺点是转换开关体积庞大，价格昂贵。在工频测试领域，目前部分互感器厂家生产的副边换挡电流互感器能较好的解决该问题。这种互感器根据原边信号将副边分为 2~4 档，从最大量程开始，以 40%~50% 的比例依次减小量程。如 2000A/1000A/500A/200A。可在 5%~100% 的范围内保证测量精度。

互感器除外，其它的诸如霍尔传感器、罗氏线圈等，目前尚无多量程传感器。需要开关对传感器的原边进行换挡，且变频信号对换挡开关的要求远比工频开关高。

### 3.5 相位误差

相位是影响功率测量的重要指标，同样的相位误差，功率因数越低，功率测量误差越大。相位误差主要包括：仪器仪表相位误差、电压传感器相位误差、电流传感器相位误差。

仪器仪表的相位误差因不同厂家不同设计而异，目前数字式高精度功率计可以做到较高的精度。电压、电流传感器造成的相位误差与传感器类型及原理有关。对于互感器而言，通常用于 50Hz 测量，《测量用互感器检定规程》对相位指标（角差）作了明确规定，如，0.2 级互感器的角差不大于 10'，准确度等级越高的互感器，其比差和角差越小。目前，除互感器外，霍尔传感

器等一般的电压、电流传感器不将相位列入考核指标。也就是说，采用这些传感器的测试系统，相位误差为未知。这种情况下，建议用户将传感器和仪器连接在一起作为系统，送法定计量单位进行计量溯源。

## 4 试验项目特点及对测试设备的要求

### 4.1 基波频率范围

本电机的额定频率为 8.5Hz，《标准》5.1.3 指出，型式试验时，应在额定频率 40%~110%范围内做空载曲线，即空载特性试验的最低基波频率为 3.4Hz。

目前，许多谐波分析设备标称的基波频率范围较宽，最低频率亦可满足上述要求。但实际应用中，尚存在一些具体问题。以日本 YOKOWAGA 公司生产的 WT3000 为例。一般用户会认为其最低基波频率可低至 0.1Hz。事实上，对于基波测试，WT3000 有三种模式。其测试范围分别如下：

#### 1、宽带宽谐波测量模式

该模式下，若 PLL 源不采用外部采样时钟时，基波频率范围为 10Hz~2600Hz。

当 PLL 源采用 3000 倍基波频率的外部采样时钟时，基波频率范围为 0.1Hz~66Hz。

#### 2、IEC 谐波分析模式

该模式下，基波频率范围为 45Hz~66Hz

#### 3、常规模式时的谐波分析

该模式下，基波频率范围为 10Hz~2600Hz。

可见，只有宽带宽谐波测量模式下，且当 PLL 源采用 3000 倍基波频率的外部采样时钟时，基波频率范围满足测试要求。实际上，以 3.4Hz 为例，此时，采样频率为 10.2ksps。由于被测信号含有高次谐波，根据采样定理，必须开启 5.1kHz 以下的 500Hz（该仪器 5.5kHz 以下的滤波器只有 500Hz 可选）反混淆滤波器。此时，

电压的测试精度为读数的 0.7%+量程的 0.3%，已不能满足标准要求。另外，对于变流器产生的 PWM 波形，500Hz 的低通滤波器将导致被测信号将严重偏离实际信号，而低通滤波器对相位造成的影响对低功率因素下功率测试精度的影响将越大于对电压或电流测试精度的影响。

### 4.2 电流测试范围

该电机的额定电流为 1833.4A。

从试验报告看，空载特性试验时，最小电流为 10.50A 左右。

过电流试验时，电流为额定电流的 1.5 倍，即 2750.1A。

最大电流约为最小电流的 262 倍。试验对测试系统的动态范围要求非常宽。以常规的换挡方式，从 3000A 至 10A，需分为 7 档以上，如 3000A/1000A/500A/200A/100A/50A/20A。

有人提出采用更高精度和线性度的传感器避免换挡。如采用精度很高的 Denfysik 电流传感器。该传感器的变比误差小于 50ppm，线性度小于 5ppm，副边输出 10V。若选用 3000A 传感器，10A 时，副边输出仅 3.333mV，在强干扰环境下，很难发挥其高精度特性。

## 5 结语

测试系统的测量结果将电机企业验证电机设计的重要依据，也是电机合格与否重要判据。测试系统的精度指标的重要性不言而喻。值得注意的是，任何测试系统的精度指标均有其成立的前提条件，因此选择测试系统时，必须紧密关注电机试验所有工况下是否与其精度条件相符。要注重指标的均衡性，重点是所有指标满足要求，而不是片面提高某项指标的要求。

---

## 【参考文献】

《低速永磁同步发电机 第2部分 试验方法》

《TFY2000-3NT 低速永磁风力发电机型式试验报告》

《GB755-2003 旋转电机确定损耗和效率的方法》

《变频器供电三相笼型感应电动机试验方法》

《GB1032-2005 三相异步电动机试验方法》

《解读测试设备的精度指标》