
变频电机计量与检测探讨

胡纪云¹,徐伟专^{2,3},庞林³

(1.湘电集团有限公司,湘潭 411101;2.国防科学技术大学,长沙 410073;3.湖南银河电气有限公司,长沙 410073)

摘要:近年来,变频电机发展迅速,许多电机厂已经或正在建设变频电机试验台,试验台的变频电量测量的正确性和准确性,是电机性能评价的关键。但是,在变频电量测量方面,国内外尚无统一的、公认的标准及规范,导致许多用户在选择变频电量计量检测设备时,盲目的追求片面的高精度指标,而忽视了测量设备的适用范围和测量结果的正确性与科学性。本文从传统工频测试中计量检测设备的相关技术标准及规范着手,结合变频电量的特点,对变频电机计量检测系统的技术要求进行了探讨,并提出了选择测量设备的一些基本原则。

关键词:变频电量;变频电机;变频测量

The Discuss About Frequency Motor Measuring

Hu Jiyun¹,Xu Weizhuan^{2,3},Pang Lin³

(1.XEMC,Xiangtan,411101;2. National University of Defense Technology,Changsha,410073; 3.Hunan YinHe Electric Co.,Ltd,Changsha,410073)

Abstract: In recent years, the converter motor has developed so fast, so many motor factories are constructing converter motor testing station, the correction and veracity about station is key for evaluate the motors' performance. But in the frequency current testing, there is no established standard domestic and overseas, leading to many users in the choice of frequency current testing equipment, seek for high precision on-sided, and ignore the scientific and correction about the measuring equipment applicable scope and measurement of the accuracy of the results. This article set about from traditional power frequency test measurement test equipment of the relevant technical standards and norms, combine with characteristics of variable frequency power, discuss the technical requirements for frequency motor testing system, and put forward some basic principles for choosing measuring equipment.

Key word: frequency current; frequency motor; frequency test.

0. 引言

近年来，变频电机发展迅速，许多电机厂已经或正在建设变频电机试验台，试验台的变频电量测量的正确性和准确性，是电机性能评价的关键。但是，在变频电量测量方面，国内外尚无统一的、公认的标准及规范，导致许多用户在选择变频电量计量检测设备时，盲目的追求片面的高精度指标，而忽视了测量设备的适用范围和测量结果的正确性与科学性。

下述问题在实际测量中较普遍：

(一) 方法错误：

国家标准明确要求电压测量应该采用基波有效值，而仪表不具备该功能，实际使用的是真有效值或修正平均值，在变频器供电试验中，两者存在较大的差距。

(二) 现场干扰影响：

仪表在计量室检定时，准确度等级较高，但是，在现场运行时，干扰信号很大，仪表的准确度指标不能有效表达。

(三) 标称准确度的条件与实际测量的条件不符：

仪表按 50Hz 标称准确度，准确度指标为 0.02 级，远远超过国家标准 0.2 级的要求，但是，在被试电机主要运行频率范围内(比如说，30Hz 以下)，仪表的准确度只有 0.3 级，不满足国家标准要求。

(四) 传感器技术指标不完整：

仪表和传感器的准确度等级均很高，但是，由于传感器未考虑相位误差，在低功率因数时，准确度不能满足国家标准要求。

(五) 传感器或仪表的测量范围不够宽：

一般传感器及仪器仪表标称的准确度是指满量程时的准确度，而电机试验时，被测电压、电流的变化范围较宽，一个传感器很难满足试验全部试验范围内的准确度指标。

这些问题，普遍的存在于电机试验的变频电量测量中，笔者发现，大部分问题并非变频电量独有的要求，而是工频测量就必须满足的。因此，本文从传统工频测试中普遍使用的互感器的相关技术标准及规范着手，结合变频电量的特点，对变频电机计量检测系统的技术要求进行了探讨，并提出了选择测量设备的一些基本要求。

1. 互感器及变频传感器的对比

1.1. 二次输出信号大

除了少数 PCB 安装的微型互感器之外，大部分工业环境下使用的电压互感器的额定二次输出为 100V，电流互感器的额定二次输出为 5A。

互感器二次输出信号为何选择 100V、5A 呢？有人认为，这是因为二次仪表一般量程都是 100V、5A 的原因。其实不然，传统的指针式仪表的表头本

质上是一个 mA 表，而电子式仪表的 AD 转换器能够直接接受的信号一般在 5V 以内。100V、5A 的信号被测量前，需要经过分压、分流等调理电路才能被测量。这个角度看，对于仪表来讲，互感器的二次输出实际上是偏大的。

那么，是不是互感器的二次输出不方便设计成小信号呢？答案是否定的。互感器基于电磁感应原理，二次输出大小由一次和二次的变比决定，完全可以设计成符合仪表要求的信号。

事实上，互感器二次输出之所以设计为 100V、5A，是考虑到互感器一般用于工业环境，工业环境下，电磁干扰难于避免。较大的信号具有较强的抗干扰能力。

在变频测量中，目前传感器以霍尔电压、电流传感器为主，霍尔传感器为有源传感器，其输出电压信号受工作电源的影响，一般在 $\pm 12V$ 以内，而电流信号一般在 200mA 以内，少数传感器的额定二次电流达到 500mA 或 1A。在变频环境下，大功率非线性设备的使用，现场电磁干扰远比传统的工频环境大，也就是说，干扰源增大了，但是，传感器的输出信号变小了，抗干扰能力降低了，此消彼长，抗干扰问题是变频测量中非常棘手的问题，如不正确对待，传感器及仪表的高准确度指标，将会大打折扣，甚至得出完全不对的结果。

1.2. 二次负荷大并加以限制

一般电流互感器的额定二次负荷在 2.5VA 以上，电压互感器的额定二次负荷在 50VA 以上，电力系统中某些互感器的额定二次负荷达到 100VA 以上。正因为互感器的二次负荷较大，因此，电能计量中，一般需要估计计量装置带来的附加损耗。

在互感器与仪表组成的系统中，互感器相当于信号源。有人认为互感器设计较大的二次负荷，是为了减小仪表内阻对互感器的影响。因此，理论上（不考虑干扰影响），电压表内阻越大，对被测信号的影响越小，测量相对越准确。

这种观点，单独从仪表对信号源的影响的角度而言，是正确的，也正因为如此，大部分的万用表的电压档的输入阻抗都设计得很大。但是，在互感器测量中，要求有所不同，由于互感器工作于额定二次负荷时，准确度最高，互感器对二次负荷的要求是一个区间。JJG313-2010 测量用电流互感器检定规程和 JJG314-2010 测量用电压互感器检定规程中对互感器的二次负荷的上限和下限均作了限制，互感器的二次负荷应在额定二次负荷的 25%~100% 之间。

额定二次电压为 100V，二次负荷为 100VA 的电压互感器，其最佳的二次电流为 1A。而现在的许多数字式仪表，其输入阻抗往往很大，这一点，在大型互感器与电子式仪表配合使用时，需要特别注意。

一方面，要求互感器使用时二次负荷的比例不能太小，另一方面，设计时又加大互感器的额定二次负荷，原因还是为了提高现场抗干扰性能。

变频测量中应用的有源传感器，一般二次输出负荷较小，与高输入阻抗的电子类仪表配套使用具有仪表附加损耗小的优点，但是，高输入阻抗的仪器对干扰更为敏感，应依据实际经验，采取减小干扰的措施。（GBT1032）

1.3. 完善的量程解决方案

任何传感器都有一定的测量范围，互感器也不例外《JJG314-2010 测量用电压互感器检定规程》中明确规定，对于0.2级的互感器，当一次输入为额定的80%时，准确度仍需满足标称指标，但是，在一次输入为额定的50%时，允许准确度降为0.3级。

因此，当输入信号的变化范围较宽时，为了满足宽范围内测量准确度。一般需要采用多个不同变比的互感器配合换档控制进行测量。其缺点是需要同时切换一次回路和二次回路，而一次回路往往是高电压、大电流信号，换档成本较高。为了降低换档成本，某些互感器设置有多个二次绕组，不同绕组的变比不同，只需在二次换档，即可满足宽范围测量的准确度要求。该类互感器在电机试验测量及电能计量室广泛使用。

相比之下，变频测量用的传感器，往往不具备二次换档的功能，只能采用多传感器一次换档的方法，一方面成本较高，另一方面，变频尤其是低频回路中带电分断的开关造价远高于工频分断开关，且制造困难，一般不用于频繁分断的场合，频繁分断将大幅缩短开关的使用寿命。

因此，有人提出另一种变通的方案。基于传感器在小信号时（相对于额定）准确度降低的规律，提高传感器的准确度指标，这样，在小信号时，仍能保持相对较高的准确度指标。比如说，额定时准确度指标为50ppm，在一次信号为额定的1%时，准确度虽然降低，但是，仍可满足0.2级的准确度要求。这种方案，在不考虑干扰的情况下，是成立的，考虑实际干扰之后，测量准确度仍很难保证。

干扰对信号的影响，可以用信噪比表示，同样的噪声，信号越小，信噪比越小，干扰的影响越大。从这个角度看，信号变小后，除了需要考虑传感器本身的准确度下降外，还应考虑干扰影响变大的因素。假设信号为额定值时，信噪比为80db，那么，在信号为额定的1%时，信噪比降为40db。信噪比为40db时噪声已经达到了有效信号的1%，此时，即便传感器和仪表没有误差，0.2级的准确度也难以实现了。

剩下的问题是，变频环境下，额定信号下，实际信噪比到底有多大？这个问题，很难有统一的、

标准的答案。因为具体干扰与干扰源有关、与传输途径有关、与有效信号的大小有关，还与测量设备的抗干扰能力有关。但是，有一个指标，足以说明问题。大家知道，专业音响的工作环境，是远远优于变频现场环境的，专业音响的传输信号，与变频电量传感器输出的信号基本相当，而专业音响在信噪比方面的要求，是一般测量设备较难以达到的。专业音响的信噪比的指标是 85db，由此可见，变频现场要实现大于 80db 的信噪比，并不容易，进而可知，高精度传感器，在 1%量程时，要实现 0.2 级的准确度指标，并非易事。

1.4. 明确的比差和角差

互感器检定规程中明确规定，一定准确度的互感器，其比差和角差必须同时满足相关的要求。这一点是显而易见的，因为互感器常用于功率计量，而功率的准确度与互感器的比差和角差均有关。简单推导可知，功率因数越低，互感器的角差对功率测量的准确度影响越大。

但是，目前几乎所有的适用于变频电量测量的传感器，均未提供角差指标。究其原因，可能与霍尔电压、电流传感器的应用领域有关，因为，现实应用中，除了互感器之外，很少有传感器用于功率计量。霍尔传感器一般只用于电压、电流独立测量的领域。传感器本身没有提供这个指标，不等于实际角差很大，也不等于实际角差很小。在霍尔传感

器的技术指标中，有两个指标与角差有关，就是上升时间和带宽。但是，只能粗略估计，并不能用于确定传感器的实际角差范围。比如说，LEM 公司的 LV200-AW/2/6400 型霍尔电压传感器，其上升时间为 500 μ S（假设数学模型为相同带宽的一阶低通滤波器）推算带宽约 700Hz，50Hz 时角差约 249'（0.2 级互感器的角差为 10'）。显然，这类传感器用于功率测量，其角差的影响远远大于比差的影响，如果我们不关注角差，那么，测量结果的准确度可想而知。

1.5. 明确的工作频率

互感器检定规程的开始部分，即明确互感器的频率适用范围为 50Hz（或 60Hz），检定条件中进一步明确信号频率范围为 50Hz \pm 0.5Hz（60Hz \pm 0.6Hz）。也就是说，其准确度指标在 50Hz（或 60Hz）时生效。但是，我们知道，互感器实际有较宽的运行频率范围，除了不能在直流下工作，理论上互感器可以工作在任意频率，只是频率变化后，互感器的测量范围和准确度都会发生变化。

实际上，用于变频电量测量的传感器，也有类似的特性。比如，霍尔传感器可以在直流至较宽的频率范围内工作，其带宽指标可以反映传感器的频率工作范围。但是，对于精确计量而言，这个带宽指标的参考价值并不大，因为，带宽指标通常是指信号衰减到正常值的 70.7% 时的频率，显然，这个

频率下，传感器是不能用于精确计量的。用户更关心的是在使用频率范围内，传感器能否满足准确度要求，或者说，在满足准确度要求的前提下，传感器的对应带宽指标能否涵盖实际运行频率。

1.6. 铁芯的利弊

铁芯的非线性及易饱和特性，导致互感器的使用范围大幅度降低，尤其是磁饱和。

那么，除了互感器工作必须之外，互感器的铁芯是否也有其它的好处呢？笔者在研究霍尔传感器、罗氏线圈、磁通门传感器等用于变频电量测量的传感器时发现，互感器的铁芯有一个上述三种传感器均不具备的好处。

互感器的一次和二次绕组，紧靠铁芯，其产生的磁力线，经过很短的气隙，即进入高导磁性的铁芯，在铁芯内部，磁感应强度得到了大幅度的提升。而周围的磁场，要经过很长的气隙才能进入铁芯，这样，周围磁场对互感器的影响程度被大幅度降低。

相比之下，霍尔传感器的霍尔元件是安装在气隙当中的，并且，由于设计时保留了充分的抗饱和裕量，气隙处的磁感应强度相对较小，外部磁场对霍尔元件的影响较大。罗氏线圈完全抛弃了导磁材料，外部磁场对其影响更大。磁通门传感器可检测非常微弱的磁场信号，外部磁场的影响更是不容忽视。

磁场干扰主要由电流信号产生，磁场较难屏蔽，因此，使用上述传感器或使用由上述原理制造的传感器，尤其是传感器安装环境附近有大电流存在时，需要特别注意外部磁场对其的影响。在三相测量中，这种情况很难避免。虽然制造厂家会采取些列抗干扰措施，提高其电磁兼容性，但是，用户应该清醒的认识到，该类原理的传感器，在电机试验环境下，实现超高精度测量是不现实的。选择传感器时，准确度指标以能满足为原则，不必过分追求过高的准确度指标。

1.7. 电气隔离

对于电机试验的电压等级范围之内，互感器的电气隔离技术已经非常成熟。相比之下，霍尔传感器的电气隔离的电压等级较低，这也是目前限制霍尔电压传感器最高测试电压的主要原因之一。

对于穿芯方式的霍尔电流传感器，只要载流体的绝缘层的绝缘强度足够，安装符合规范，电气隔离可以得到有效保障。对于霍尔电压传感器，则必须严格遵守传感器标称的被测电压范围及隔离电压，这一点，直接影响测量设备和人员的安全，需要特别注意。但是，目前，仍有部分用户或集成商，为了拓展霍尔电压传感器的电压测试范围，在传感器外部串联超过标称值的电阻，用于测试高于标称值的电压，这样做，是非常危险的。

2. 变频功率测量设备选择的基本要求

复杂电磁环境下的变频功率测量，对测试设备的要求，远远高于工频下互感器的要求。遗憾的是，用于工业环境下功率准确计量的变频电量传感器，目前国内外均无标准可依，对其各项技术指标，亦无检定规程可循。但是，我们不能因为没有标准和规程，就认为没有要求，也不能因为没有标准和规程，就把进口品牌当成标准和规程，而是应该从实际出发，对测量设备的相关性能指标进行合理的评估和检测。

第一、变频电量测试设备的技术要求，首先得满足工频测量的要求，上节中列举的互感器的特性，都是在工频测量领域积累的宝贵经验，在变频测试中，需要特别的注意。

第二、变频电量测量的一个显著特点是适用的频率范围较宽。这一点，从用户的角度讲，要求也是很清晰的，原先工频测量设备提供的技术指标是50Hz时的指标，对于变频电量测试设备，只需扩大这些指标的频率适用范围，使其能够涵盖试验实际发生的频率范围即可。

第三、还需要充分考虑测试系统，包括传感器、仪器仪表、传输电路及工作电源等在内的各个环节的电磁兼容性能。

第四、互感器及工频仪表的相关技术及标准规

范非常成熟，独立选择互感器及仪表，经过合理的二次负荷及布线设计，可以较简单的估算最终的系统误差范围。变频电量传感器则不然，系统各个环节的不确定因数较多，建议用户将所有环节构成系统后，按照系统进行校准检定，在试验室可能发生的幅值、频率、相位范围内获取其实际系统误差。

3. 解决方案

湖南银河电气有限公司针对变频电机试验的特点，研制了适合在复杂电磁环境下实现宽范围内高精度测量的、基于前端数字化技术的系列 AnyWay 变频功率测试系统。该变频测试系统由 SP 系列变频功率传感器及 WP4000 变频功率分析仪构成，为变频电机的计量检测提供了完善的解决方案。该系统技术特点如下：

第一、测量模式：以基波有效值（H01）作为基本测量模式，并同时具备真有效值（RMS）、校准平均值（MEAN）、算术平均值（AVG）等模式供用户选择；

第二、电磁兼容性：采用先进的前端数字化技术，将被测量在传感器端进行数字化处理，转换为数字信号，再通过光纤传输至变频功率分析仪，避免传输线路引入干扰，减少引入误差的环节，极大的增强了系统的电磁兼容性能；

第三、标称准确度：AnyWay 变频功率测试系

统以测量范围内的最差准确度作为系统的标称准确度，全量程范围内保证测量准确度的一致性；

第四、相位指标：AnyWay 变频功率测试系统改变传统的电压、电流传感器、功率计三处相位补偿方式，将电压、电流传感器组合在一起，合并为功率传感器内一处电压、电流相差补偿，简化了电路，提高了相位测试精度，进而提高宽相位范围内的功率测量精度；

第五、幅值测量范围：AnyWay 变频功率传感器采用 2^N 量程转换方案，电压、电流传感器均在内部设置了 8 个量程，传感器根据测试结果进行自动无缝量程转换，每个量程只工作在半量程以上区域，从而保证了宽范围的高精度测试；

第六、计量检定：传统的测试系统由电压、电流传感器及功率计组成，一般采用独立计量方式，系统精度（组合精度）无法评定，AnyWay 变频功率测试系统采用整体溯源方式来进行系统精度的标定，保证检定结果与实际应用的一致性；

第七、多峰值因数测量：变频电机一般采用变频电源供电，变频器的调制模式不同（如正弦 PWM 调制、非正弦 PWM 调制等），输出波形的峰值因数不同，AnyWay 产品根据瞬时值，自动选择最佳量程，支持任意峰值因数波形的测量；

4. 结语

湖南银河电气有限公司研制的 AnyWay 变频功率测试系统，能完善的解决目前变频电机计量检测所存在的难题。去年该公司又与国防科技大学及湖南省计量检测研究院合作，成功研制 10kV、500A、5~400Hz 的变频功率标准源，该标准源于 2012 年 8 月通过有关部门组织的鉴定，鉴定委员会认为：该项目研制的高电压、大电流变频功率标准源，填补了国内外空白，整体技术达到国际先进水平，其中量程和频率范围等技术指标，居国际领先水平。该成果为开展我国变频电量量值溯源体系建设打下了良好的基础。

参考文献

- 【1】 JJG 313-2010 测量用电流互感器检定规程。
- 【2】 JJG 314-2010 测量用电压互感器检定规程。
- 【3】 金惟伟,李宝金,陈伟华等《GB1032-2005 三相异步电动机试验方法》中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.2005。
- 【4】 葛永广,赵伟等。变频器功率因数的测量与分析。
- 【5】 秦超华。变频信号的测量方法。西安航空技术高等专科学校学报。