

# 更加便利的电能质量仪器测试

## -从试验室到现场测试

Lukas Dieterich (OMICRON electronics GmbH / 斯图加特大学)、  
Cord Mempel (OMICRON electronics GmbH)、Adrian Eisenmann (斯图加特大学)

lukas.dieterich@omicronenergy.com

奥地利

### 摘要

各种电压等级电网中安装的电能质量仪器日益增多，说明了电能质量越来越受到重视。本文简述了此类设备符合 IEC 标准的现有测试框架。对于制造厂型式试验和相应的电力公司验收测试，本文根据 IEC 62586-2，提出了一套指导性的 PQ 仪表测试计划。本来测试仪制造商已经有完整的测试模板，但进行了全面修改，以反映标准的最新变化，从而为用户提供测试指导，特别是为测试评估提供实质性支持。文中还讨论了典型的 PQ 仪表测试中的一些发现。此外，本文还介绍了 PQ 仪表调试或例行现场测试的适用测试项目。

### 关键词

电能质量，电能质量仪器，型式试验，测试模板，IEC 61000-4-30，IEC 62586，EN 50160

## 1 引言

随着分布式能源（如光伏电站）的不断增多和越来越多的非传统负荷，电能质量 (PQ) 对电网运行的影响不断加大。电力公司需要证明发输配电符合规范标准（如 EN 50160）；工业需要就所接受的能源质量达成合同协议；甚至消费者也越来越频繁地体验到 PQ 问题的影响。根据《欧洲电能质量调查报告》，欧盟每年因电能质量问题而导致的附加成本超过 1500 亿欧元 [1]。随着电力电子器件和非线性元件在电网中的应用不断增加，这二者对电能质量的影响趋势将延续下去。

这导致越来越多的电能质量仪表安装在电网内部及其外部连接点上，然而其故障或准确度降低将会对电网运营商造成经济上的影响。从另一方面来看，特别是小型电力公司、工业和终端消费者，基本没有电能质量监测的应用经验并且缺乏正确的认识。这反映了这样一个事实，即在欧盟，用于电能质量改善和监测的投资仅占上述成本的 10% 左右 [2]。

电能质量监测系统的基本要求是高测量准确度，以及系统在运行中完全正常工作。但在许多情况下，在安装新的 PQI（电能质量仪表）时并没有重视这一点，此外，通常不会进行日后的检查或例行测试。因为除了继电保护装置外，对于其他二次设备的安装、例行测试或校准目前还没有通用的规程。因此，尽管 PQI 故障或准确度降低可能会产生重大的经济影响，但仍未引起充分注意。

如今，高压或中压电网中使用的大多数 PQI 都为根据 IEC 61000-4-30 的 A 级或 S 级仪表。对于这些设备，标准 IEC 62586-1 和 -2 规定了对制造商的要求和要求进行的型式试验。原则上，这些试验的适用项目可用于在调试和维护测试中评定 PQI（验收测试）。但是，这些标准中定义的试验非常耗时，而且不易理解。测试评估是另一个难题，例如当对被测设备的特性曲线的多个测试点进行后期处理时。

但与此同时，市场上其实可能已经有了合适的测试设备：许多最先进的继电保护测试仪的准确度也符合 PQI 测试的要求。借助测试计划和正确的软件模块，PQI 测试不再“艰深复杂”，而是与继电保护测试类似。

为此，本文提出了一种简便、清晰、实用的 PQI 测试方法。

## 2 基于 IEC 61000-4-30 的 PQ 现象

简而言之，电能质量是指理想正弦信号与电网中实际存在的波形之间的一致程度。在传统上，PQ 被理解为电压质量。但如今在频率和电压之外，还包括供电可靠性和电流等参数。

对于 PQI 的测试，标准 IEC 61000-4-30 列出了以下参数：

- 频率稳定性
- 电压现象
  - 幅值变化
  - 电压暂降、电压暂升和中断
  - 谐波、间谐波
  - 不平衡
  - 闪变
  - 快速电压变化
- 电流现象
  - 幅值变化
  - 谐波、间谐波
  - 不平衡
- 载波信号电压

此外，还包括对特殊设备功能进行的测试：

- 电压事件的引起的测量值标记
- 内时钟的准确度
- 外部影响量的变化。

从扰动到停电甚至到接入电网设备的破坏，都可能与电能质量有关。尤其是工业环境中出现的电压暂降和短暂中断以及浪涌和瞬变均造成了经济损失 [1]。

## 3 PQI 测试

### 3.1 PQI 测试的标准

PQI 测试的规范性基础在不同的 IEC 标准组成的的框架中定义。这不太容易被理解困惑，因此在下面简要描述并显示在图 1 中。PQI 测量标准化的基础是 IEC 61000-4-30，其中定义了原则方法，并规定了包括准确度要求的设备分类（A 级或 S 级）。同时通用设备规范部分参照 IEC 62586-1 标准，（型式试验）测试信号的实际描述参照 62586-2 标准。在某些特殊情况下，测试程序中还需要包括附加标准 IEC 61000-4-2、61000-4-7 和 61000-4-15。

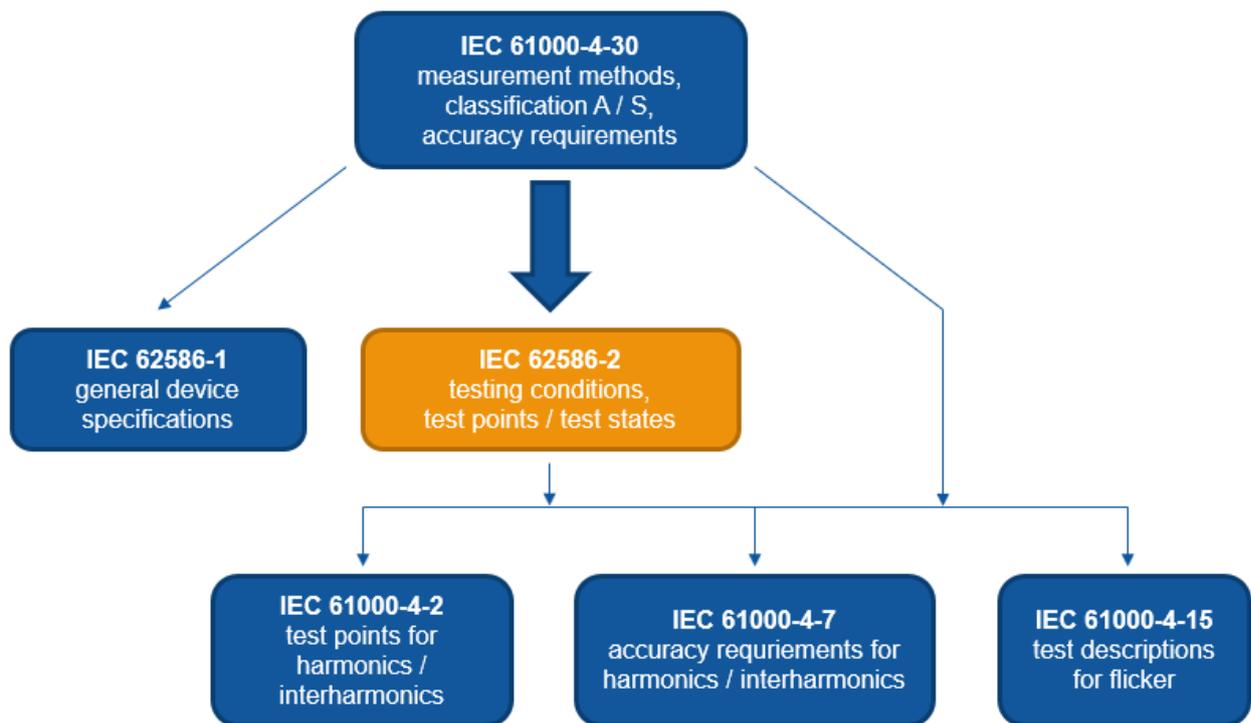


图 1: PQI 测试的 IEC 标准框架

### 3.2 测试接线

PQI 测试对测试仪的典型要求:

- 3 个电压输出通道
- 3 个电流输出通道
- 高准确度 (对应于被测 PQI 仪器的级别)
- 准确模拟 PQ 现象的软件模块
- 测试仪能够执行自动测试计划
- 测试允许时间同步, 并可以由时间信号触发。

对于某些测试, 测试仪和 PQI 的时间同步是强制性的, 例如评估短期闪变  $P_{st}$  或时钟不确定性。对于许多其他的测试, 时间同步不是强制性的, 但对于测试过程的顺利进行和简化评估非常有用。

在本文的实际工作中, 我们使用测试仪 OMICRON CMC 256plus 和 CMC430 进行测试, 因为它们都满足 A 级 PQI 测试的准确度要求。所测试设备为 Siemens SICAM Q200 和 Eberle PQI-DA (均为符合 IEC 61000-4-30 的 A 级 A 仪器)。对于时间同步, 使用 CMGPS 588。在许多测试中, 借助于 CMC430 的 Enerlyzer Live 功能进行参考测量。在图 2 中可以查看测试接线。

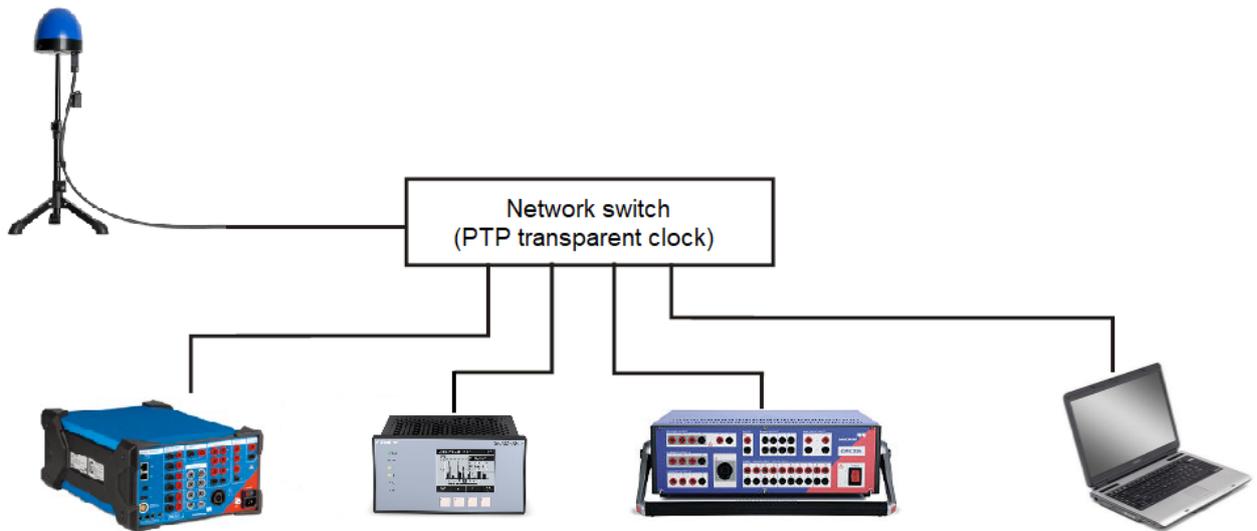


图 2：用于 PQI 测试的测试仪：GPS588（顶部）、CMC 430（左侧）、SICAM Q200（中间）、CMC 256plus（右侧）、计算机（自有图片，OMICRON [3] 和 Siemens [4] 图片的来源）。

### 3.3 测试模板

PQI 测试的执行和评估可能相当复杂。因此，我们制定了测试计划，解释所执行的测试，并为用户提供评估指导。它们包含运行测试所需的所有信息，例如测试仪、测试对象的设置，当然还有测试信号的设置。

测试计划可自动适应所定义的额定电压和待测 PQI 的额定频率。

借助这些模板，用户可直接开始测试。用户可以很轻松地执行和评估每一项测试，甚至不需要对章节 3.1 中提出的标准框架有深入了解。模板将自动运行所有必要的测试，只有程序对话框为用户提供信息时才会暂停。每个模板都允许用户根据测试项目为所使用的测试仪和测试对象创建特定的条目。此外，测试模板可以修改以适应任何特殊的测试用例；也可以进行单独的适配调整（例如，要执行的测试步骤、事件前时间的长度或与 PQ 现象相关的参数，如闪变幅度）。

### 3.4 评估

与测试结果依赖于开关量信号的继电保护测试不同，PQ 测试的评估需要更多信息。在某些情况下，用户可以通过 PQI 显示屏上的仪表读数来获得评估相关的测量值。但对于大多数测试用例，评估基于从 PQ 仪表存储器中读取的测量值和计算值来完成。此外，还有一些测试，在这些测试中，需要对相关数据进行后期处理以进行评估。

创建的测试模板将在每次测试后自动要求用户进行评估。用户可以用 *通过/失败/未评估* 进行测试评估。选择 *手动评估* 后，可以随时更改评估结果。因此，我们的建议是，用户应该在第一步中以 *未评估* 评估测试。稍后，在第二步中，通过借助其他的软件工具（如 Excel），以完成最终评估。

测试模板为评估提供用户指导，包括用于测试数据的后期处理的 Excel 电子表格。因此，用户可以快速进行评估，而无需费时地查阅标准。

## 4 符合 IEC 62586 标准的型式试验和验收测试

之前已经按照 IEC 62586 早期版本设计了一些测试模板。为涵盖目前 IEC 62586-2 最新标准中定义的所有测试，首先就需要更新和扩展这些测试模板，当然某些测试并未包含在内，例如温度影响测试。测试模板附带有用户使用手册，为用户在 PQI 测试中提供更好的支持。

测试模板中的对话框为用户提供了每个单独测试项目的基本信息，因此不用再去通读 IEC 标准。同时，每个模板的结构符合 IEC 标准 62586-2 的相关章节的规定；测试点和额定值也是如此。

用户可以据此进行型式试验或验收测试。当然，这些测试主要是由 PQI 制造商或大型电力公司进行，以对某些 PQI 设备进行入网验证。但是，易用性、简单的测试接线和通用测试仪的使用拓宽了这些测试的应用范围。在第 5 章中，我们讨论了如何在调试和维护期间将部分测试项目用于现场测试。

## 4.1 测试用例示例

实现大多数规定的测试条件可以通过操作输出信号的简单的特征参数实现，如递变、状态序列或一个或两个电压或电流参数的变化。但是，也存在比较复杂的信号，例如 IEC 62586-2 中的如下方程 [5]：

$$u_H(t) = \sqrt{2}U_{din} \cdot \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) + [1 + A_m \cdot \cos(2\pi f_m t + \varphi_m)] \cdot 0,1 \cdot \sqrt{2}U_{din} \cdot \cos(2\pi M f_n t + \varphi_M) \quad (1)$$

其中：	$u_H(t)$	瞬时值电压，谐波含量 $H$	V
	$U_{din}$	额定电压	V
	$f_n$ 、 $f_m$	额定频率、调制频率	Hz
	$\varphi_n$ 、 $\varphi_m$ 、 $\varphi_M$	基本、调制、谐波信号的相位	°
	$A_m$	调制幅度	V
	$M$	谐波次数	-

此公式的“含义”是：输出某个谐波次数的谐波电压信号，该谐波以频率  $f_m$  进行幅值调制并叠加到额定电压上。

对于许多测试信号，我们进行了参考测量，以验证输出信号的准确度和定时时序符合标准中给出的要求。图 3 示出标准中描述的一个测试用例，而图 4 示出来自测试仪的相同信号的输出。

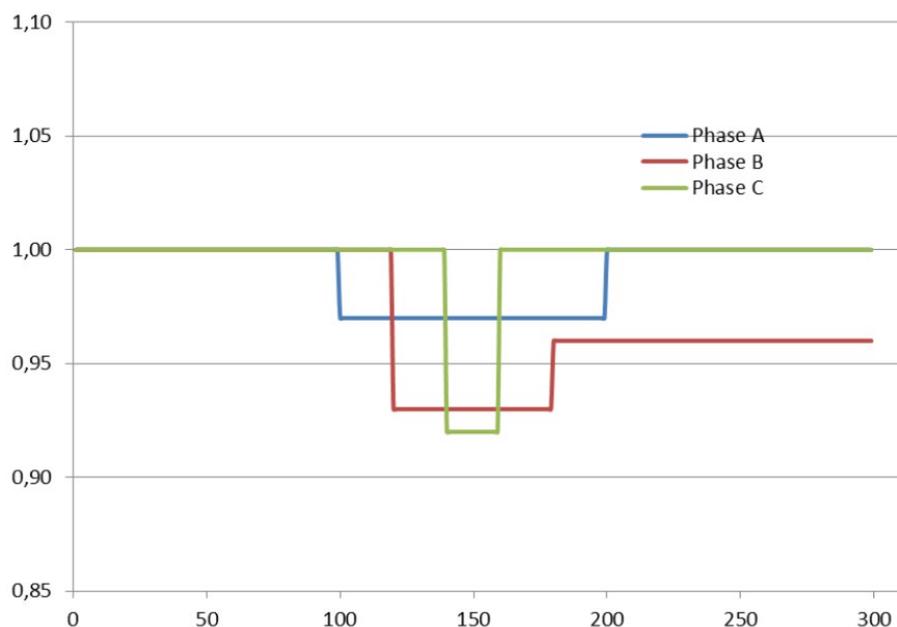


图 3: 标准中描述的测试信号; x 轴时间为半周期; y 轴: 标么值电压 (来源: IEC 62586-2 [5])

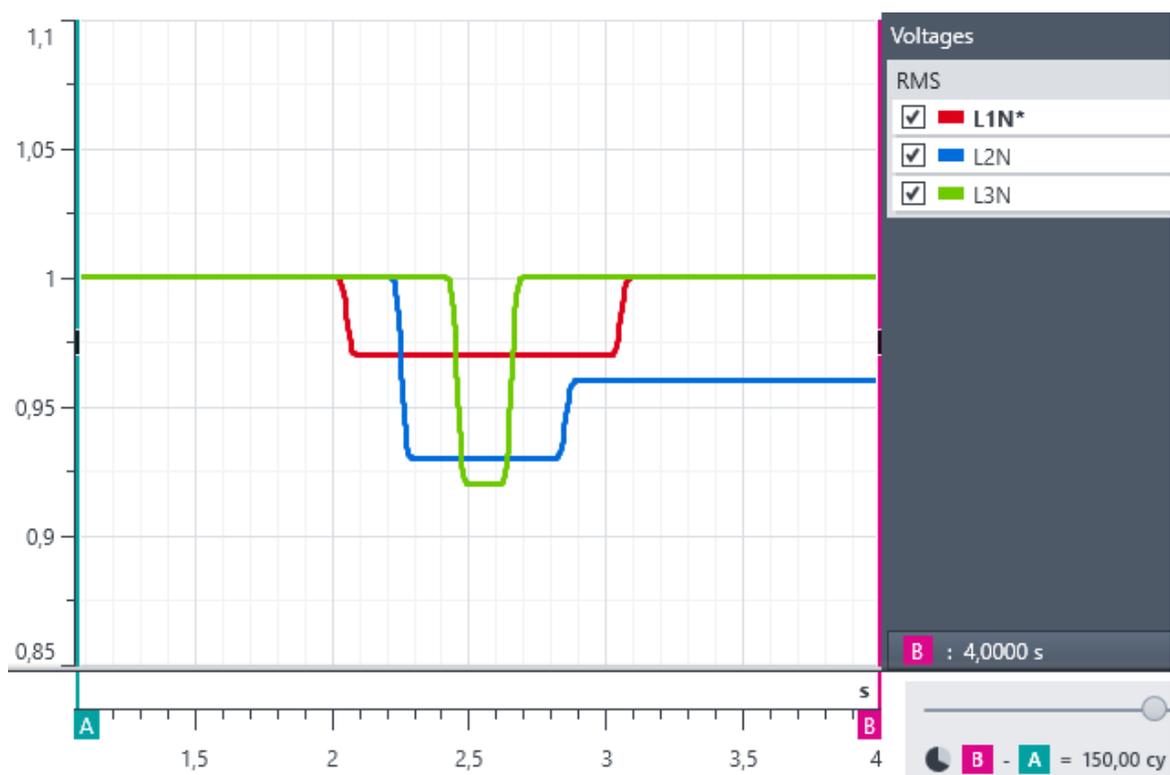


图 4: 参考测量的测试信号

## 4.2 使用模板实际测试 PQI 的发现

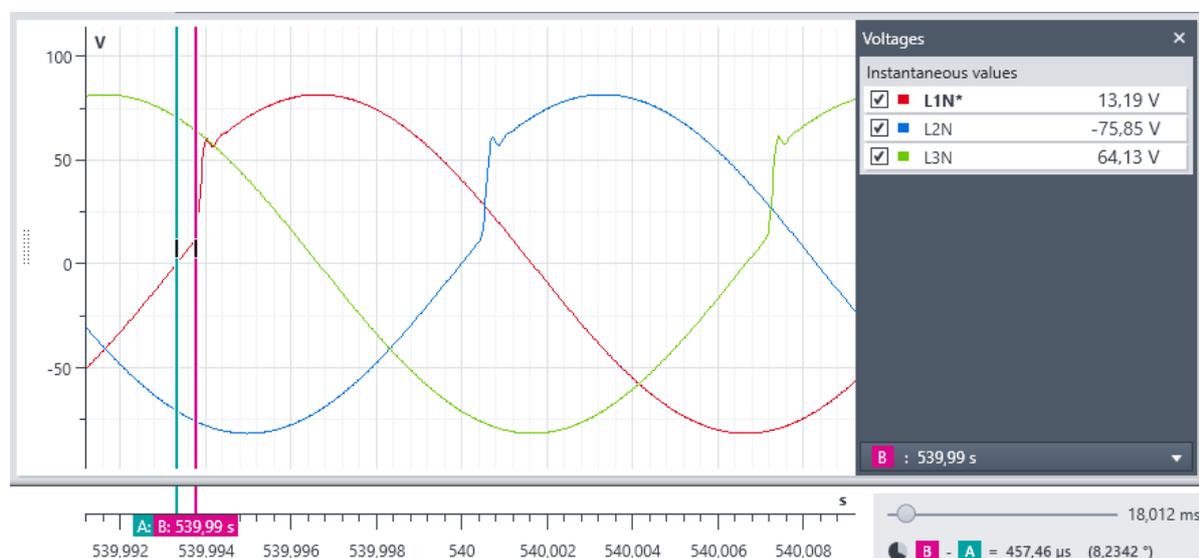
一般的发现首先是模板的设计是正确的和可执行的, 可以根据需要产生相应测试信号。其次, 我们意识到, 执行和评估 IEC 62586-2 中定义的所有测试需要大约两周的时间 (即使通过模板节省了大量时间)。

更具体的发现涉及时间同步和事件前后时间的正确调整。时间同步和时间触发开始的测试使测量值的评估容易得多，并且对于某些测试，甚至必须使用外部时间源。例如，对于无缝和非重叠测量，因为必须评估特定的测量值时间序列。所有类型的测量值累积测试都需要时间同步，因为测量必须累积到下一个完整的十分钟。事件前（事件前时间）和事件后（事件后时间）输出额定值信号，表示电网的正常状态。由于PQI具有较高的测量速度和准确度，对于大多数评估瞬时值的测试而言，时间同步不太重要。但同时也有一些测试，比如短期闪变  $P_{st}$ ，需要定义好事件前时间，这是因为  $P_{st}$  是建立在十分钟的连续测量基础上的，测试信号从零输出突然跳变到设定的值将导致不正确的测量结果。在这种情况下，一个类似的问题是，最大瞬时闪变  $P_{inst,max}$  所需的准确度也是在恒定的事件量输出几分钟后才能首次达到。此外，根据我们的检查，这些测量稳定时间随 PQI 的变化而不同。

### 4.3 限制和提高

我们意识到测试仪硬件和软件的某些限制上。

- CMC 256plus 的辅助直流电压输出限制为 264 VDC。某些被测设备可能需要更高的辅助直流电压（可能需要外部标准直流电源）。
- 用于模拟量输出的 CMC256plus 的内部系统时钟为 10 kHz。因此，模拟输出采样点每 0.1 ms 产生一次。对于有关相位跃变的测试，各自正好发生在每一相的过零点处，必须考虑到这一点。在 50 Hz 时，这意味着两相过零点之间的时间延迟为 6.67 ms ( $t = \frac{1}{3} \cdot 20 \text{ ms} = 6,6\overline{6} \text{ ms}$ )。在该情况下，定义测试（模板）时必须考虑小数点舍入。图 5 显示两种情况下的输出信号：
  - a) 没有适当的舍入。相位跃变不完全发生在过零点处。
  - b) 有适当的舍入。过零点的时间误差在 A 级 PQI 的准确度范围内。



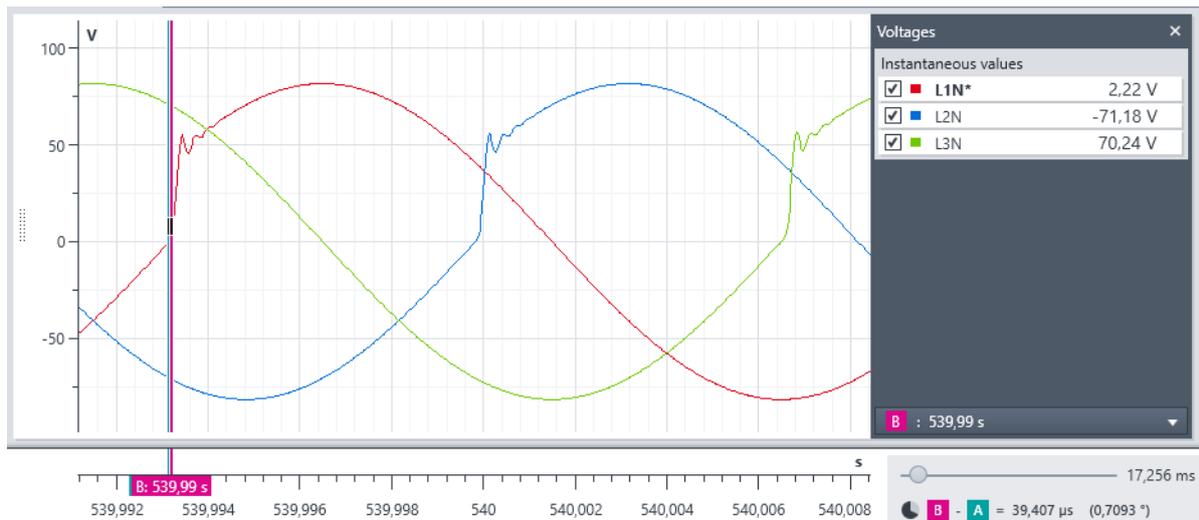


图 5：相位跃变测试的输出信号：a) 没有适当的舍入；b) 有适当的舍入（向下）

## 5 例行测试

对于调试或例行测试，必须显著减少测试用例的数量。测试持续时间必须从 2 周缩短到例如 2 小时（类似于保护继电器测试的时间）。

首先，我们根据以下标准排除了与调试或例行测试无关的测试：

- 测量方法检查：测试测量方法的正确实现是型式试验的一部分，对于最终用户来说，测量值的准确度比基础测量方法更重要。
- 可预测的结果：如果没有合理的怀疑，我们不建议使用可预测的结果进行测试，例如，没有施加谐波畸变的测试不会产生与零值差异显著的 THDS 测量结果。
- 实际应用相关性：如果用户不能理解和解释测试的评估结果，或者只有很少的测试用例，那么测试是不实用的。例如， $-10^{\circ}\text{C}$  时，电压为额定值 10% 的测试条件在变电站中应该不会经常发生。如果发生了，则 PQI 的准确度以外的其他问题将是优先考虑的。
- 适用性：在现场试验条件下，某些测试的环境条件下的不能重现。

其次，我们根据每个测试的持续时间、复杂性和重要性对其进行评分，以得出例行测试相关性的最终分数。结果是一种选择，整个测试持续时间约为一小时（纯测试持续时间：无评估，通过程序对话框读取，...），至少包括图 6 中的测试。在目前的情况下，这只是供进一步讨论的草案。

Template	Topic	Number	Description
6.1	Frequency	A1.2.2	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.2	Voltage magnitude	A2.2.2	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.3	Flicker	F6.2.1	Check response characteristic for sinusoidal and rectangular voltage changes
6.3	Flicker	F6.2.2	Check response characteristic for sinusoidal and rectangular voltage changes
6.4	Swells, dips	A4.1.2 a)	Check amplitude and duration accuracy for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.2 b)	Check amplitude and duration accuracy for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 a)	Check threshold for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 b)	Check threshold for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 c)	Check threshold for swells and dips
6.4	Swells, dips	A4.1.3 d)	Check threshold for swells and dips
6.5	Voltage unbalance	A5.1.4	Check accuracy of voltage unbalance measurement
6.6	Voltage harmonics	A6.2.1	Check measuring uncertainty – single even harmonic
6.6	Voltage harmonics	A6.2.2	Check measuring uncertainty – single odd harmonic
6.6	Voltage harmonics	A6.2.3	Check measuring uncertainty – single high harmonic
6.6	Voltage harmonics	A6.2.4	Check measuring range – low end
6.6	Voltage harmonics	A6.2.5	Check measuring range – high end
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.2	Check measuring uncertainty – single low order interharmonic
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.3	Check measuring uncertainty – single medium order interharmonic
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.4	Check measuring uncertainty – single high order interharmonic
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.5	Check measuring range – low end
6.7	Voltage interharmonics	A7.2.6	Check measuring range – high end
6.8	MSV	A8.2.1 a)	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.8	MSV	A8.2.2 a)	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.8	MSV	A8.2.3 a)	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.13	RVC	A13.4.1	Check correct detection of RVC in a polyphase system
6.14	Current magnitude	A14.2.2	Check measuring uncertainty under reference conditions
6.15	Current harmonics	A15.2.1	Check measuring uncertainty – single even harmonic
6.15	Current harmonics	A15.2.2	Check measuring uncertainty – single odd harmonic
6.15	Current harmonics	A15.2.3	Check measuring uncertainty – single high harmonic
6.15	Current harmonics	A15.2.4	Check measuring range – low end
6.15	Current harmonics	A15.2.5	Check measuring range – high end
6.16	Current interharmonics	A16.2.2	Check measuring uncertainty – single low order interharmonic
6.16	Current interharmonics	A16.2.3	Check measuring uncertainty – single medium order interharmonic
6.16	Current interharmonics	A16.2.4	Check measuring uncertainty – single high order interharmonic
6.16	Current interharmonics	A16.2.5	Check measuring range – low end
6.16	Current interharmonics	A16.2.6	Check measuring range – high end
6.17	Current unbalance	A17.1.5	Check accuracy of current unbalance measurement

图 6: PQI 例行测试的测试项目选择 (IEC 62586-2)。

## 6 摘要和后续步骤

在 17 个测试模板中实现了约 250 个电能质量仪器测试的单个测试，着重于清晰度、适用性和用户友好性。连同一份 90 页的用户手册，非 PQ 专家应能根据 IEC 61000-4-30 执行 IEC 62586-2 中所列的所有类型的 PQI 测试。

此外，我们还介绍了一个 PQI 的未来例行测试的草案，主要包括测试结果和评估结论对最终用户（如电力或工业）来说是有意义和重要的测试。

下一步将进一步开发例行测试的概念。应以科学的方式证明并调整当前的测试选择。为了在现场进行实际验证，我们正在寻找合作伙伴，以确保所选的测试用例适合在现场执行，并确保它们提供了所需的关于所使用的 PQI 的功能和准确度结果。

## 参考文献

- [1] J. Manson 和 R. Targosz, “European Power Quality Survey Report,” Leonard Energy, 2008.
- [2] R. Targosz 和 D. Chapman, “The Cost of Poor Power Quality,” Leonardo Energy, 2015.
- [3] OMICRON, CMGPS 588 User Manual, Klaus: OMICRON, 2015.
- [4] Siemens, “Siemens.com,” 2019. [ 联 机 ]. Available: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/energieautomatisierung-und-smart-grid/netzqualitaet-und-messung/netzqualitaetsrekorder-sicam-q200.html>. [访问日期: 21. Januar 2019].
- [5] IEC, 62586-2:2017 Power quality measurement in power supply systems - Part2: Functional tests and uncertainty requirements, Geneva: IEC, 2017.

OMICRON 是一家以创新性的测试与诊断解决方案服务于电力行业的国际化公司。OMICRON 产品的应用可以让用户能够对其系统中的一次和二次设备的状态作出评估，并且完全可以信赖。再加上在咨询、调试、测试、诊断和培训方面提供的服务，形成了完整的产品范围。

全球超过 160 个国家的用户依赖于本公司的能力来提供质量优良的领先技术。位于各大洲的服务中心提供广泛的知识及优质的客户服务。所有这一切，与我们强大的经销网络结合在一起，使我们成为电力行业的市场领先者。

## OMICRON 中国办事处

奥幕电力技术咨询（上海）有限公司  
中国上海市杨浦区杨树浦路 288 号建发国际大厦 303 室  
(邮编: 200082)

电话: 021-53391010  
邮箱: [Info.china@omicronenergy.com](mailto:Info.china@omicronenergy.com)

更多信息、其他资料以及我们全球各地办公室的联系信息，  
请访问我们的网站。

For more information, additional literature, and detailed contact  
information of our worldwide offices please visit our website.