

# 使用高级测试工具调试亚谐波保护 IED

R. Midence, A. Oliveira, N. Perera - ERLPhase Power Technologies Ltd

E. Carvalheira, K. Donaldson - OMICRON electronics

## 摘要

能够检测亚同步谐振 (SSR) 条件的保护装置在近年来应用日益普遍。此类保护装置的出现也为测试和调试这些装置带来新挑战。调试亚谐波保护装置需要遵循的流程不同于微处理器装置的传统测试和调试流程。本文将介绍笔者在亚谐波保护继电器调试期间的经验，并说明使用高级继电器测试系统 (OMICRON CMC 356、Test Universe 模块递变和 PQ 信号发生器以及 OCC 模板) 的流程，以及现场访问之前和继电器实际调试期间建议遵循的流程。

本文将探讨以下主题：

- 谐波保护 IED 的特性
- 用于确定 IED 的工程流程
- 如何确定 IED 用例以确保 IED 所有功能均正确
- 如何使用高级 IED 测试系统
- 使用高级 IED 测试系统和 IED 在 IED 测试期间遵循的流程。

在亚谐波保护继电器调试期间笔者发现，现场对于 SSR 和 SSCI 现象、亚谐波保护 IED 设置选择背后的工程设计以及此类 IED 的测试和调试流程了解甚少，因此需在保护和社区开展相关教育。

本文将说明如何使用高级继电器测试系统，包括利用其中的软件来创建用于对所有继电器功能和设置验证进行测试的脚本。在创建测试脚本之前，流程要求检查用于确定继电器设置的电源系统模拟用例，以便创建可确认继电器按预期响应的测试用例。流程要求测试以下各项：

- 谐波频率范围 - 确保 IED 不会在所需频率范围之外的频率进行操作
- 谐波幅值 - 确保 IED 不会在幅值低于定义的谐波幅值进行操作
- IED 所有相关功能，例如每个持谐 IED 的操作数、谐波失真、二次和五次谐波等
- 基波频率下的保护功能

**关键词：** 亚同步谐振 (SSR)；亚同步相互作用；输电线路；串联电容器；亚谐波；高级继电器测试系统

## 引言

近年来已有若干论文介绍了电力系统元件之间不同类型的亚同步相互作用，特别是涉及大型蒸汽发电机、风力发电场、HVDC 和串联补偿输电线路的情形。

亚同步相互作用 (SSI) 是指一系列物理作用，涉及在低于系统额定频率的交流频率下发电机和输电系统之间进行的能量交换，包括 SSR、SSTI 和 SSCI。可能存在多种类型的亚同步相互作用，包括亚同步谐振 (SSR)、亚同步扭转相互作用 (SSTI) 和亚同步控制相互作用 (SSCI)。特别是 SSR 和 SSTI，由 Andrew L. Isaacs、Garth D. Irwin 和 Amit K. Jindal 在 [1] 中完整记录并予以详细解读和说明。

电气电子工程师学会 (IEEE) 发布的亚同步谐振指南 [2] 探讨了 SSR 和装置相关亚同步振荡的最基本方面，并引用相关参考文献支持这些论述。

北美电力可靠性委员会 (NERC) 在 2011 年 7 月 26 日发布了《经验教训 - 串联补偿输电线路与发电装置之间的亚同步相互作用》。这份教训总结指出，近期发生在风力涡轮机与输电网络中串

联电容器之间的亚同步振荡事件对风力涡轮机造成严重损坏。当时 345 kV 输电线路上一故障已正常清除，采取事故后系统配置，其中两个风电场径向连接至串联补偿 345 kV 输电线路。该配置在风力涡轮机和串联补偿输电线路之间产生亚同步控制不稳定 (SSCI)，导致严重过电压、电流失真、其他输电设施跳闸以及风电场控制电路损坏。文件最终得出结论认为，在研究大型风电场集成时，需要考虑对输电系统设计进行适当增强。可以考虑的一些措施包括安装其他保护系统，用于检测 SSR 并采取纠正措施；以及安装其他保护系统，用于避免基于系统拓扑的 SSR。

NERC 前置保护继电器供应商建议开发一种亚谐波保护继电器，能够检测亚同步相互作用，以便采取纠正乃至预防措施。

K. Narendra 等作者在 [3] 中详细说明了基于微处理器的继电器，该继电器专为检测和防止亚同步相互作用而设计。[4][5][6] 详细介绍了亚谐波保护继电器的应用、用于计算设置的工程流程，还提出了验证继电器性能的流程。

本文重点讨论针对亚谐波检测功能以及基波频率保护功能的亚谐波保护继电器现场验收测试流程。

## 亚谐波保护设置说明

[6] 亚谐波保护继电器通过测量亚谐波的电压和电流幅值来防止亚谐波振荡，其中 50 Hz 系统的频率范围为 5-45 Hz，60 Hz 系统为 5-55 Hz。继电器包含四组电流和两组三相电压输入。各个输入可以设置为对 50 Hz 系统 5-45 Hz 或 60 Hz 系统 5-55 Hz 的单一频率进行检测，具有两个检测级别。该装置还能够对任意两个电流输入的参量进行求和，这项实用功能支持监测两个断路器关联线路中的电流，将电平检测器应用于这些求和参量。

各个电流或电压检测器采用以下亚谐波检测设置：

- 50 Hz 系□的可□□率范□□ 5 至 45 Hz, 60 Hz 系□□ 5 至 55 Hz
- □□波□平启□□
  - □定□比
  - 基波□比
- 延□
- □□□波失真
- 每分□操作数□置
- 二次□波□□ - □适用于□流□□器
- 五次□波□□ - □适用于□流□□器

设置格式如下方图 1 和图 2 所示。

Current 1

Detector 1

Name:Current 1 Det 1

Pickup Delay:10.000 s

Minimum Frequency:5 Hz

Maximum Frequency:25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting:100 % of 5A = 5.00A

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting:100 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting:100 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting:20 operations/minute

Second Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold:20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Fifth Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold:20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Detector 2

Name:Current 1 Det 2

Pickup Delay:10.000 s

Minimum Frequency:5 Hz

Maximum Frequency:25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting:100 % of 5A = 5.00A

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting:100 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting:100 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting:20 operations/minute

Second Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold:20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

Fifth Harmonic Blocking

☐ Enabled

Threshold:20 % of 5A = 1.00A

☒ Cross Blocking

图 1 - 电流检测器设置

Main Voltage

Detector 1

Name:Main Voltage Det 1

Pickup Delay:10.000 s

Minimum Frequency:5 Hz

Maximum Frequency:25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting:5 % of 69V = 3.45V

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting:5 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting:5 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting:20 operation/minute

Detector 2

Name:Main Voltage Det 2

Pickup Delay:10.000 s

Minimum Frequency:5 Hz

Maximum Frequency:25 Hz

Nominal Ratio

☐ Enabled

Setting:5 % of 69V = 3.45V

Fundamental Ratio

☐ Enabled

Setting:5 %

Total Sub-Harmonic Distortion

☐ Enabled

Setting:5 %

Operations / Minute Setting

☐ Enabled

Setting:20 operations/minute

图 2 - 电压检测器设置

后续小节将说明图 1 和图 2 所示的保护功能。

### 频率范围

频率范围是继电器将要监测的亚谐波频率范围。频率范围的边界由最小频率和最大频率定义，如图 1 和图 2 所示。除 TSHD 外，超出频率范围的亚谐波频率一律不考虑用于设置应用。

[3] 用于检测亚谐波的基本原理是在用户定义频率范围的最小频率和最大

频率之间比较每个亚谐波的幅值，然后将其与用户定义的幅值阈值水平进行比较。

出于测试继电器目的，有必要证明继电器已对频率范围内的亚谐波频率加以区分。

### 亚谐波电平启动值

亚谐波电平启动可与额定变比和基波比率设置相关联。

[3] 额定亚谐波功能会将启动电平设置与亚谐波幅值和继电器额定电流或电压输入之比进行比较。同样地，基波亚谐波检测器会将启动电平设置与亚谐波幅值和基波参量之比进行比较。当频率范围内任何亚谐波的额定或基波比率

超过启动电平设置时，表明继电器将启动。[3] 图 3 为相关图解。

测试期间，有必要证明继电器能够精确计算额定和基波变比幅值，并在指定精度范围内的相应设置下启动。

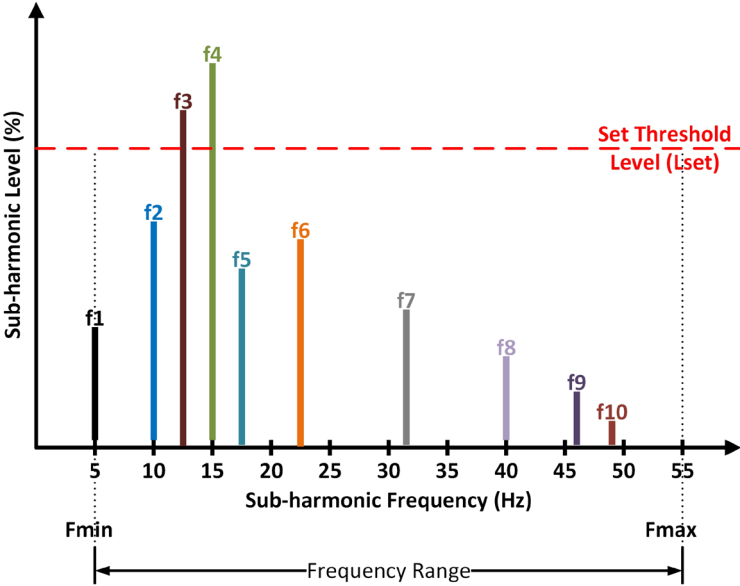


图 3 - 60Hz 系统额定和基波变比的亚谐波电平

### 总亚谐波失真

[3] 总亚谐波失真 (TSHD) 检测器计算的失真电平如下：

$$\text{TSHD}(\%) = \frac{\sqrt{f_{5\text{Hz}}^2 + f_{6\text{Hz}}^2 + f_{7\text{Hz}}^2 + \dots + f_{55\text{Hz}}^2}}{f_{60\text{Hz}}^3} \quad (1)$$

[3] 注意，如上式所示，对于 60 Hz 的基波电压、电流或虚拟派生通道，在 TSHD 评估中将考虑 50 Hz 系统 5-45 Hz 或 60 Hz 系统 5-55 Hz 的所有亚谐波幅值。相同定义也适用于 50 Hz 系统。

测试此功能将验证继电器是否正确计算 TSHD，以及是否在指定精度范围内以设定值启动。

### 每分钟操作数

[3] 此功能目的在于对超出阈值设置限值的亚谐波振荡进行计数，其持续时间短于配置的时间延迟，可能在上述常规检测器并未查出的情况下发生。即使持续时间短于配置时间，此事件周期性发生也可能会对电力系统网络及其组件产生负面影响，特别是在大型热力发电机或风力发电机中。为捕获此类事件，设计了一种特殊的每分钟操作数检测器，其功能如图 4 所示。

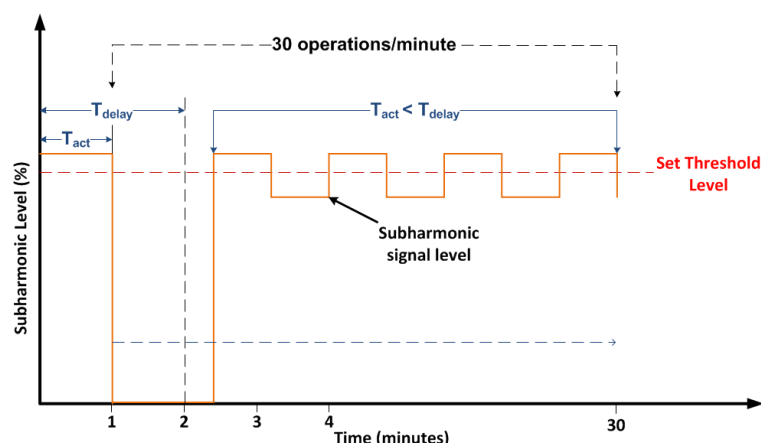


图 4 - 每分钟操作数原理

[3] 上面的示例中描述了每分钟 30 次操作的事件（未按比例）。时间  $T_{act}$  对应于所认定亚谐波信号的实际持续时间。此事件未由上一节中提到的常规检测器捕获，因为尚未超过启动延迟  $T_{delay}$ ，事件不易查出。将对 30 次操作（认定超出设置限值）进行内部计数和监测。如果设定的每分钟操作数超过计算的计数，此特殊检测器将根据配置发出跳闸指令或警报。通过这种方式可捕获持续时间短于配置限值的周期性干扰。

测试此功能可以确认继电器是否准确测量每个事件的持续时间，继电器是否正确识别持续时间短于  $T_{delay}$  的事件数，以及是否准确计算持续时间较短的事件数。

### 二次和五次谐波闭锁

由于继电器将受到暂态影响，包括变压器或馈线启动浪涌或是变压器一次绕组超通量，因此通过谐波闭锁，继电器可测量电流波的二次和五次谐波含量，并闭锁继电器操作，从而消除误跳闸（浪涌电流可能含有大量二次谐波分量和五次谐波以防止超通量）。

测试这些功能可以确认继电器是否从电流波中正确提取二次谐波和五次谐波（其中还可能包含亚谐波），并在二次谐波和五次谐波含量超过阈值设置时正确闭锁跳闸输出。

### 测试继电器功能

#### 测试设置

图 5 所示为用于测试的设备设置。

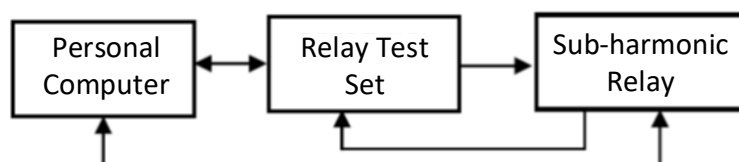


图 5 - 用于测试的设备设置

继电器测试系统应当能够生成不同含量的亚谐波信号，叠加至基波频率，以测试继电器功能并验证继电器设置。

### 测试边界和启动值

对于亚谐波检测器的设置（电压和电流），可通过选择“最小频率”和“最大频率”来设置亚谐波频率范围。最小和最大频率设置由“额定变比”、

“基波比率”及与之关联的元件使用。可以通过两种不同的方式分别设置每个元件的阈值：(a) “额定变比”，元件阈值由亚谐波分量幅值与额定参量幅值之比定义；(b) “基波比率”，元件阈值由亚谐波分量幅值与电压和电流的基波分量幅值之比定义。

要启动“额定变比”和“基波变比”元件，必须满足两个条件：亚谐波分量幅值分别导致变比大于元件的“设置”阈值，并且亚谐波分量的频率在频率范围设置以内。

使用能够在特定亚谐波频率下递变电压和电流幅值的软件工具，可以测试频率范围和启动阈值的边界。对于下述测试，频率范围设为 5 Hz 至 45 Hz，电流启动阈值设为 100 mA。

Figure 6 所示为针对此测试配置的测试模块的屏幕截图。通过在额定频率下对每个相位施加额定电压和 2.5 A 负载电流来执行整个测试序列（参见 Figure 6 中的 {1}）。创建了五个递变段用于模拟我们要测试的以下条件：

- □□ 1：引入此状况旨在□□□□器不会□低于最小□率范□的□□波□

率□行□操作。□□波□率□ 4 Hz 且幅□大于启□□的恒定□流，将叠加到信号上（参□ {2}）。可在□□信号□□（参□ {3}）中□□□□器没有跳□。

- □□ 2：在□范□□□量到足□的□□波含量□，□□□□器是否跳□。5 Hz □的□流幅□□上移□□，直至□□器跳□。□□各□□持□□□□ 5 秒，大于元件跳□延□□□。□估窗口（参□ {4}）□示□□器在□得启□□□ 102 mA □跳□。
- □□ 3：与□□ 1 相同，但此□段□□波□ 46 Hz。由于不符合□率范□□准，因此未□□任何跳□。
- □□ 4：与□□ 2 相同，但此□段□□波□ 45 Hz。□估窗口（参□ {4}）□示□□器在□流幅□□到 102 mA □跳□。
- □□ 5：□在□定□率下施加信号。□□器复位。

如果相应功能已启用，则可以重复相同流程来测试电压检测器元件的频率边界和启动值。

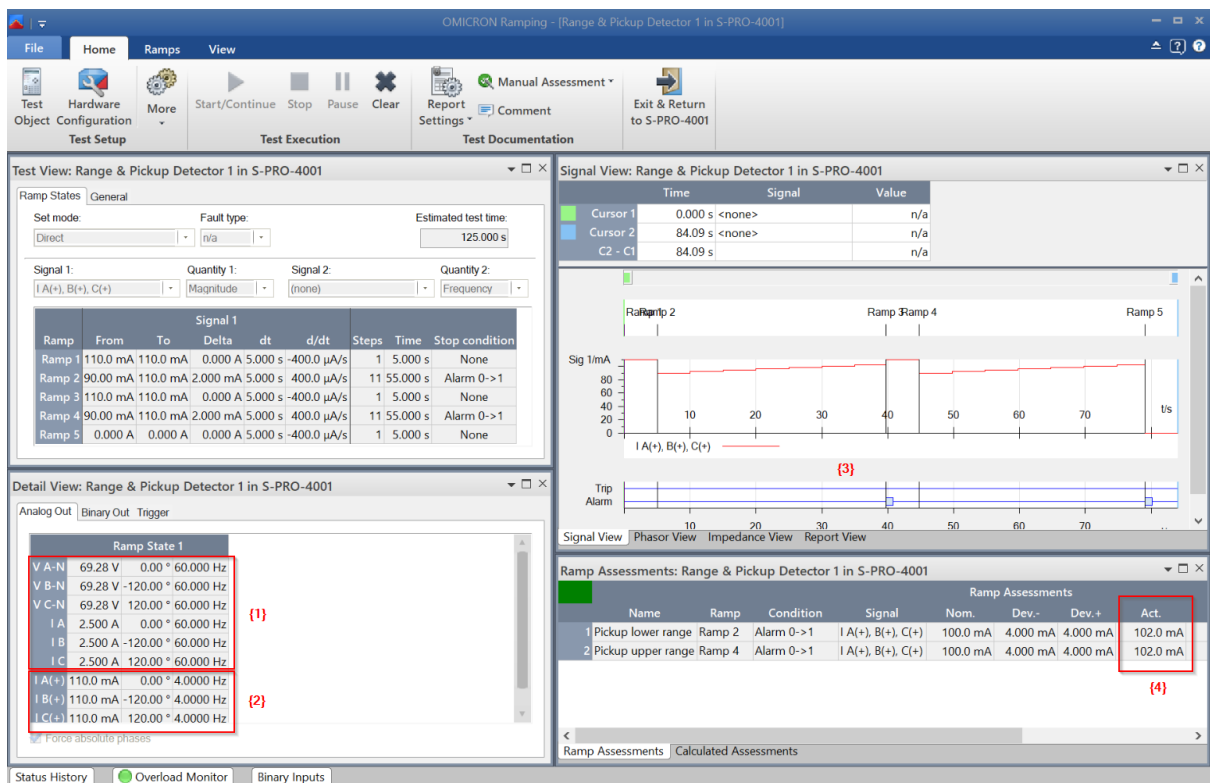


图 6 - 频率边界和启动值的测试配置

### 测试总亚谐波失真 (TSHD) 元件

对于“总亚谐波失真 (TSHD)”，元件的阈值由 5 Hz-45 Hz (50 Hz 系统) 或 5 Hz-55 Hz (60 Hz 系统) 中所有参量幅值总和与基波参量幅值之比来定义。要启动“TSHD”元件，所有亚谐波参量幅值总和必须大于 TSHD 元件的阈值 (在此测试期间设置为 5%)。

为执行此测试，在额定频率下施加

额定电压和 1 A 电流。5、25 和 45 Hz 的亚谐波频率会添加至电流信号。模拟两个信号，其亚谐波含量为：

- THD  $\square$  6.93%， $\square$  明高于 $\square$  定 $\square$   $\square$  跳 $\square$  (Figure 7)。
- THD  $\square$  4.92 %， $\square$  明 $\square$   $\square$  器不会 $\square$  低于 $\square$  定 $\square$   $\square$  的 $\square$   $\square$  行 $\square$  操作。

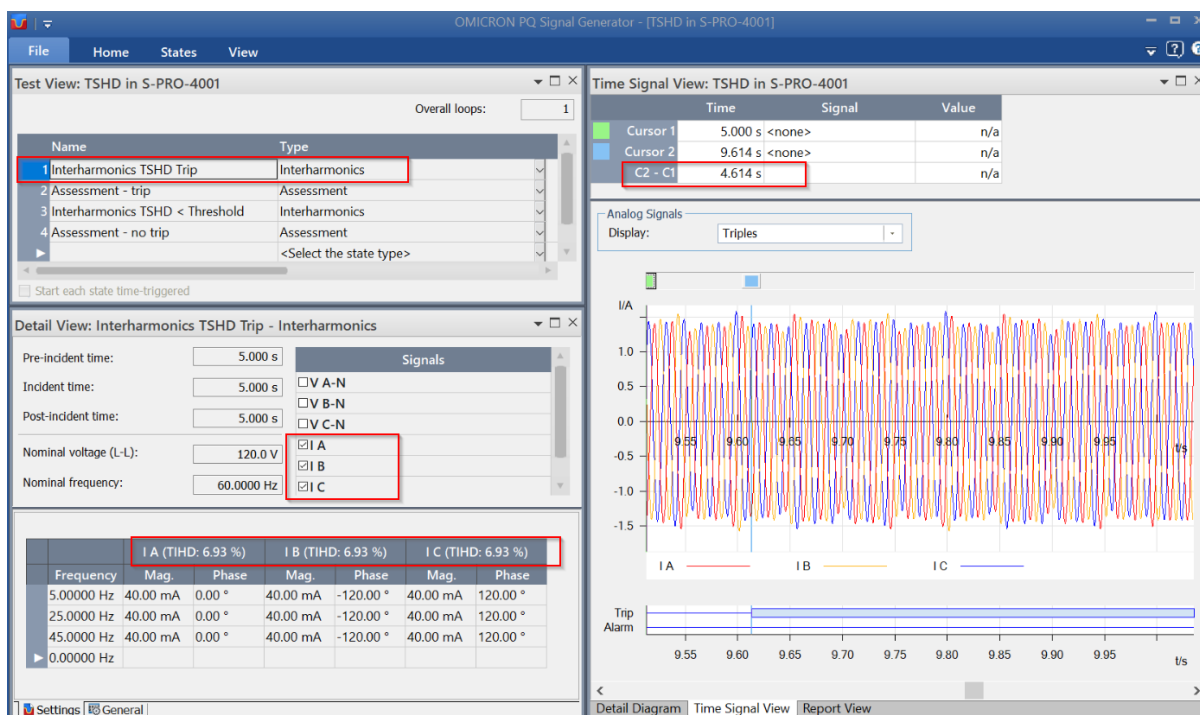


图 7 - 用于测试总亚谐波失真 (TSHD) 跳闸的电流波形

### 测试每个持续时间的操作

对于“每个持续时间的操作数”元件的设置（电压和电流），可以设置一定持续时间（以分钟为单位）中的发生次数。发生是指事件出现一次，其中“额定变比”、“基波变比”或“TSHD”元件启动，但持续时间不超过用于提示 S-PRO 跳闸的“启动延迟”。“每个持续时间的操作数”元件仅在与之关联的亚谐波元件之一已启用时才可用。

要启动“每个持续时间的操作数”元件，一分钟内的发生次数必须大于其阈值。

Figure 8 所示为此测试的配置。自

定义一个信号，其亚谐波频率幅值为 25 Hz，高于启动值，但持续时间仅为 3 秒，短于设置的 4 秒启动延迟。

测试工具支持通过定义参数“循环次数”来重复相同信号，如Figure 8 所示。元件设置为每 2 分钟进行 25 次操作，因此信号配置为重复 25 次。由于每次重复的持续时间为 4 秒（事件前 1 秒加上事件时间 3 秒），因此整个测试时间约为 1 分 40 秒。在第 25 次重复结束时，可以观察到继电器跳闸。Figure 9 所示为测试报告，证明测试仪在第 25 次操作结束后且在 2 分钟间隔内检测到元件操作。

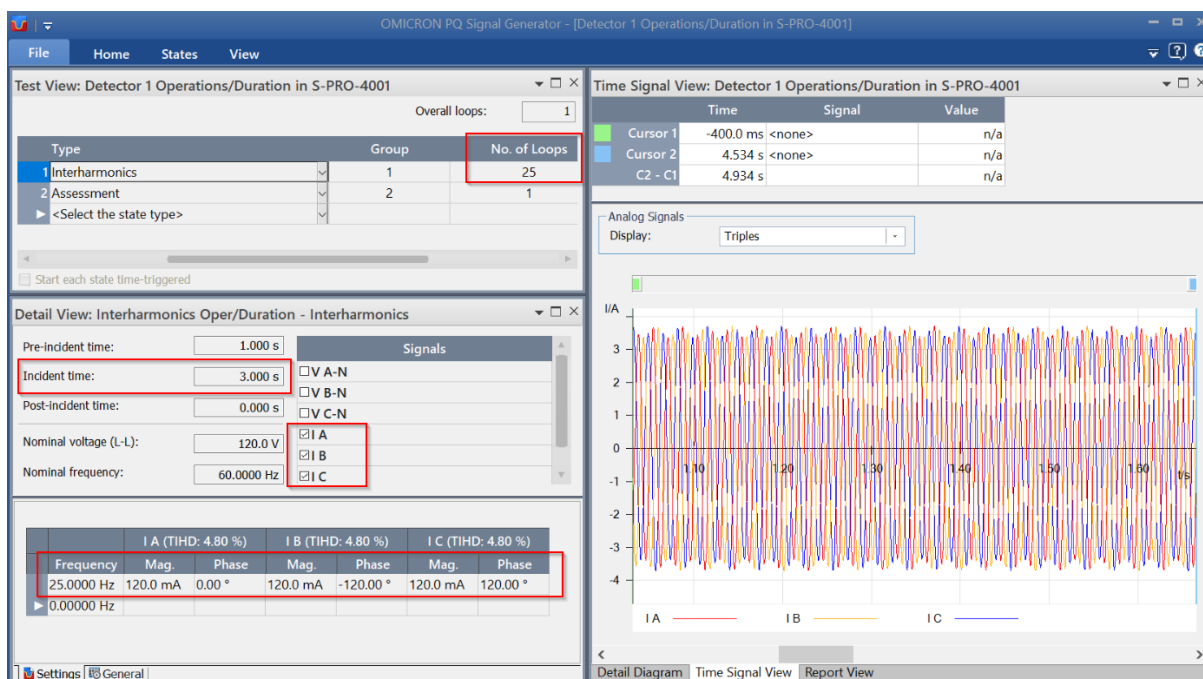


图 8 - 用于测试每分钟操作数的波形

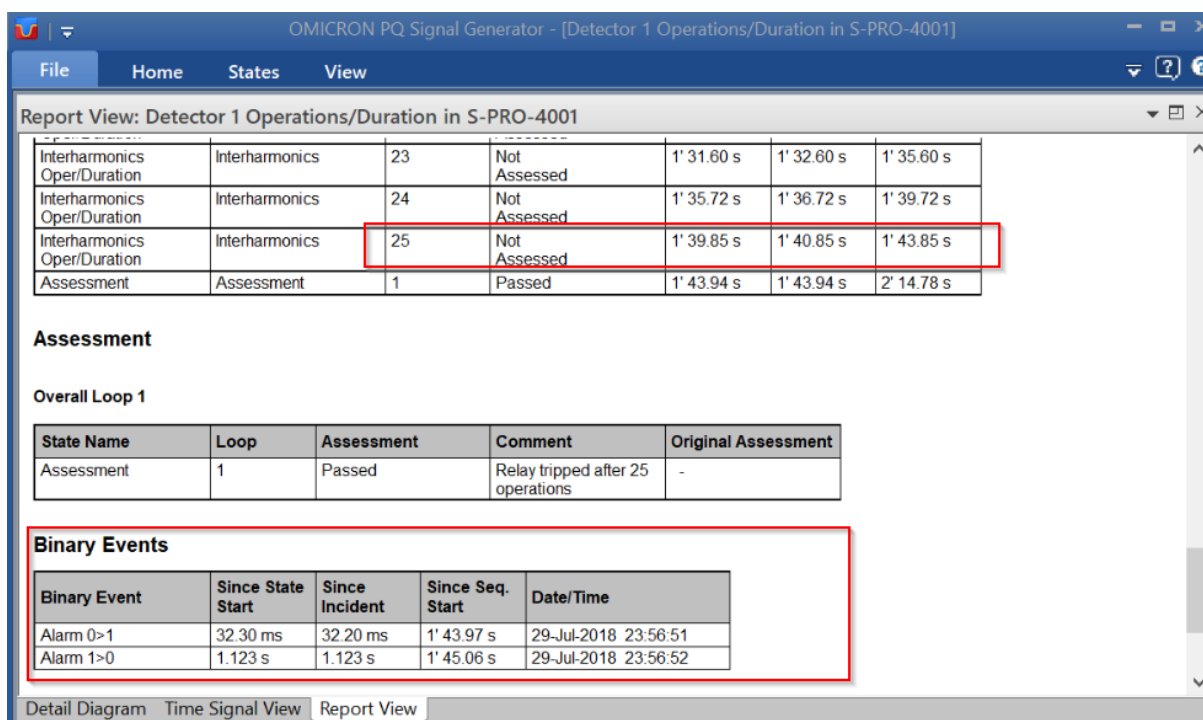


图 9 - 每分钟操作数测试报告及开关量事件记录

## 测试操作时间

为验证继电器的启动延迟时间，将创建具有基波分量和 25 Hz 亚谐波分量的信号。基波和亚谐波电流分量为固定

值，其幅值足以提示 S-PRO 亚谐波检测器启动。通过跟踪开关量事件，可以从时间信号示波器视图中观察继电器的延迟时间，如Figure 10 所示。

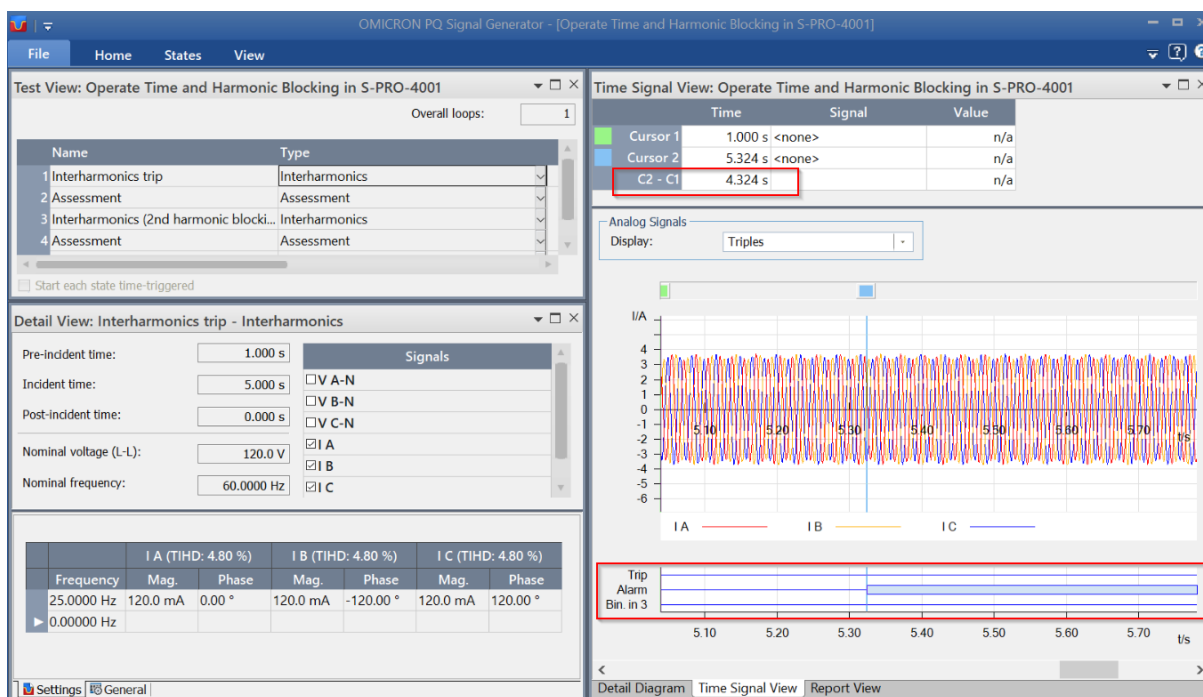


图 10 - 启动延迟时间测试

## 测试二次谐波闭锁

对于“二次和五次谐波闭锁”元件的设置（仅电流），这些元件的阈值分别由二次谐波分量幅值或五次谐波分量幅值与额定电流幅值 5 A 或 1 A 之比来定义。

要使“二次谐波闭锁”和“五次谐波闭锁”元件闭锁亚谐波检测器，二次谐波和/或五次谐波的分量幅值与额定电

流之比必须大于各自的阈值。

此测试的执行方式与Figure 10 中的操作时间相同，但现在再向信号中添加一个二次谐波分量，如Figure 11 所示。二次谐波的幅值设置为大于“二次谐波闭锁”元件阈值，从而闭锁亚谐波元件的操作。

测试“五次谐波闭锁”元件时可采用与“二次谐波闭锁”相同的方式。

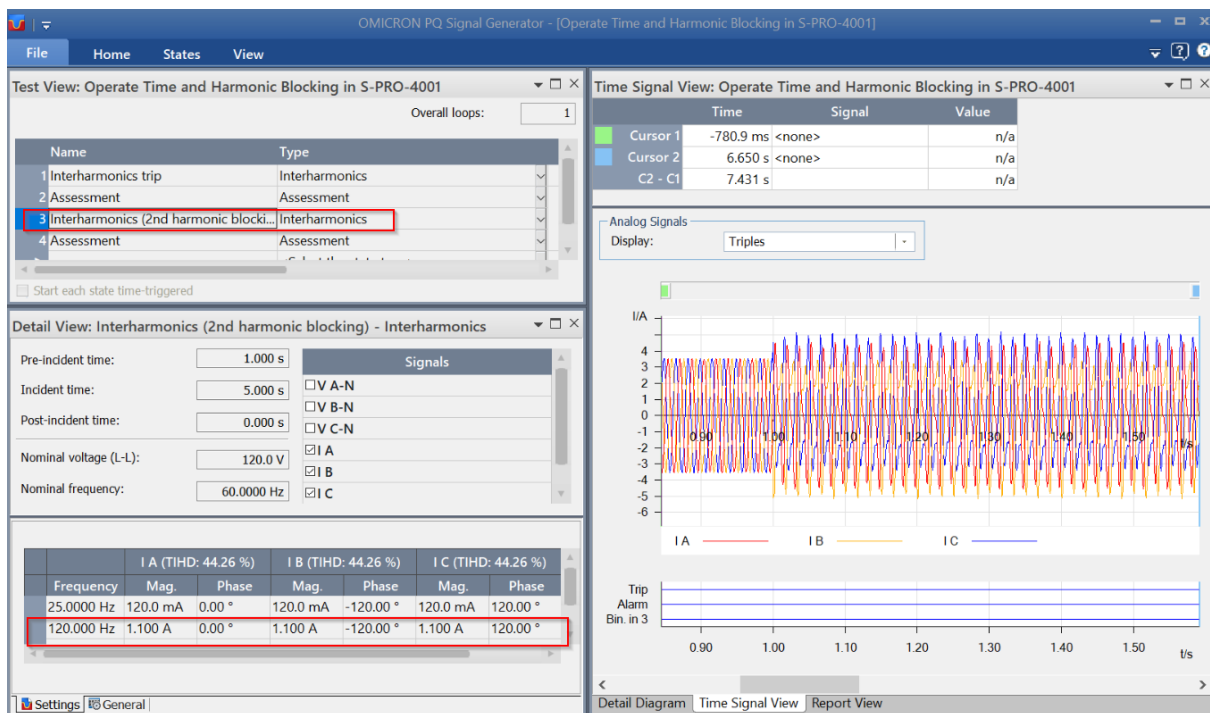


图 11 - 二次谐波闭锁测试的波形

## 结论

本文旨在通过高级继电器测试系统描述亚谐波保护继电器调试的测试程序，该系统能够生成模拟适当测试用例所需的波形。

提供测试流程的完整描述，并通过相应示例说明用于测试每项功能的典型波形。

重点指出，单纯注入电流和电压之后无法直接测试亚谐波保护继电器，因为每项测试都要求采用特定的基波信号和亚谐波含量组合。

本文论证了针对以下亚谐波检测设置测试电流或电压检测器的流程：

- 可□□率范□□ 5 至 55 Hz 之□
- □□波□平肩□□
  - o □定□比
  - o 基波□比
- 延□
- □□□波失真

- 每分□操作数□置
- 二次□波□□
- 五次□波□□

## 1. 参考文献

- [1] “Sub-Synchronous Control Interactions between Type 3 Wind Turbines and Series Compensated AC Transmission Systems”, Andrew L. Isaacs, Member, IEEE, Garth D. Irwin, Member, IEEE and Amit K. Jindal, Member, IEEE
- [2] “Reader’s Guide to Sub-Synchronous Resonance” and IEEE Committee Report by Sub-Synchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee, Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992
- [3] “A Microprocessor-Based Sub-Harmonic Protection Technique for Wind Farms”, Krish Narendra, Dave

Fedirchuk, Adi Mulawarman, Pratap  
Mysore, IEEE EPEC Conference 2  
011

- [4] “New Microprocessor Based Relay to Monitor and Protect Power Systems against Sub-Harmonics” , K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, N. Zhang, A. Mulawarman, P. Mysore, V. Sood., IEEE EPEC Conference 2011
- [5] “Performance Evaluation of a Sub-Harmonic Protection Relay Using Practical Waveforms” N. Perera, K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, V. Sood, IEEE EPEC Conference 2012
- [6] “Sub-harmonic protection application for interconnections of series compensated lines and wind farms” , René Midence, Joe Perez, P.E., Adi Mulawarman, Western Protection Relay Conference 2012, Pullman, Washington.

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.