

# 使用系统方法的母差保护自动测试

Christopher Pritchard | OMICRON electronics

产品管理

奥地利 Klaus

christopher.pritchard@omicronenergy.com

**摘要** - 由于输电所和大型变电站短路视在功率较高，采用了专用母线保护方法。母线断电的影响会导致对母线保护的速度和稳定性要求很高。由于变电站内的母线拓扑不同，所保护的每种配置特别是逻辑，都是独一无二的。为了保证准确的性能，在调试期间对整个母线保护进行测试是必要的。

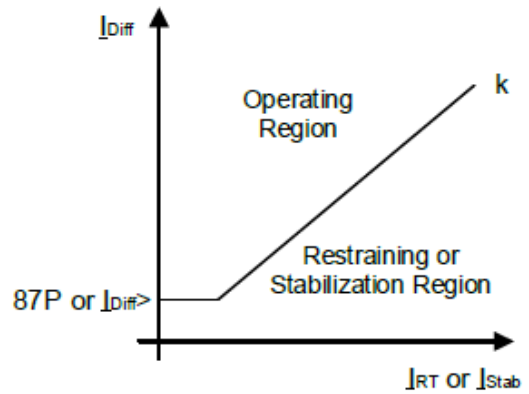
多母线、母线耦合器和间隔的复杂母线拓扑的母线保护测试和验证，一直是调试工作中最具挑战性的任务之一。对百分比约束特性的单一测试，不能为正确的保护操作提供足够的可靠性。采用系统方法，对整个母线拓扑结构及其所有隔离开关配置进行建模，为所有需要验证的重要故障场景提供了新的可能性。

本文将使用基于该全新测试方法和发现的错误，分享来自世界各地不同公用设施的经验。

**关键字** - 母线保护测试 系统测试

## I. 测试差动元件

母线保护的主要保护功能由差动元件提供，这些差动元件应用基尔霍夫定律来识别其区域内的故障。差动测量通常用百分比特性来稳定，如图 1 所示。



$$I_{RT} = |I_1| + |I_2| \dots + |I_3|$$

$$I_{diff} = |I_1 + I_2 \dots + I_n|$$

图 1: 百分比特性

最先进的测试解决方案可以对特性实现可视化，通过在平面中进行散射，软件模块将计算测试仪的电流，然后相应地评估跳闸和不跳闸情况。测试仪将两个三相电流注入两个间隔单元。

但是，测试简单的百分比特性可能成为母线保护的难题。为了实现母线选择性跳闸，保护方案会基于隔离开关位置复制母线拓扑（即隔离开关或隔离器复制）。为了保持高度安全性，该方法引入了一个必须进行拾取的附加检查区域。检查区是一个附加的差动元件，其中一个区域包含所有间隔电流互感器 (CT)。检查区域独立于隔离开关复制 [1]。为了避免过度稳定，检查区域采用特殊逻辑来选择需要特殊测试仪的限制量，其中一个三相电流通过两个间隔循环，第二个电流注入第三个间隔 [2]。此外，总线选择元件和检查区元件也会重叠。为了便于测试，在测试期间对每个特性设置进行了更改，同时禁用元件或使用测试触点。我们认为这是一种非常危

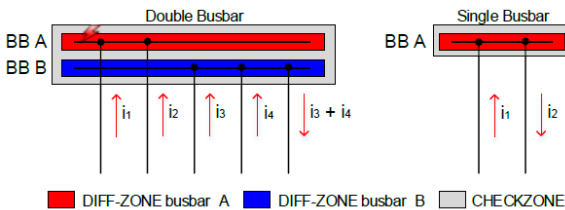


图 2 不同的母线区域

险和值得怀疑的做法。其中存在使保护处于不一致状态，或绕过将要运行的实际保护逻辑的潜在风险。

到目前为止，这种基于设定值的测试可以验证元件和继电器是否依据给定的设置正常工作。在这里停止以进行测试，将不能满足现代母线保护的复杂性带来的要求。在进行测试时需要特别注意：

- 逻辑功能，如断路器故障 (BF) 和死区故障检测
- 隔离开关复制的配置是否正确
- 包括所有功能的整体保护共同发挥作用
- 所有电流输入都以正确的 CT 比率工作。
- 与间隔、馈线和后备保护的协调

这些领域的潜在问题通常分为逻辑、设置和设计错误。研究证明 [3] 对于任何保护，这都是最常见的错误原因。由于测试保护总是必须在深度和资源之间实现正确的平衡，因此在最有可能出现错误的地方进行测试至关重要。因此，我们建议将基于系统的测试作为母线测试的一个组成部分。

## II. 基于系统的测试

基于设置的测试可以根据给定的设置检验继电器的元件和功能。相反，基于系统的测试验证保护系统在实际电力系统条件下是否正常工作。并非用稳态输出测试特性，而是用电力系统模拟计算故障（或其他系统条件）并直接输出。通过这种方式测试专门为电力系统设计的保护系统，及其逻辑和设置是否实际为该电力系统工作。另外，基于系统的测试在测试的准备、执行和故障排除过程中节省了大量时间，我们将在下面的段落中详细说明。

由于所有可能的母线拓扑结构，几乎每个母线保护系统的应用都是独一无二的。因此，没有测试隔离开关复制和其他逻辑的标准方法。为了实现正确运行，在运行期间，母线保护需要知道所有间隔、分段器及耦合器的拓扑结构和隔离开关位置。因此，测试系统必须以一致的方式，通过隔离开关状态和不同间隔电流的所有开关量信息，来模拟整个母线电力系统。保持一致意味着模拟值是合理的，例如，只有在相应电流路径内的所有隔离开关断路器闭合时才测量电流。否则，诸如测量监控、隔离开关监控和断路器故障功能将阻止保护在实际条件下工作，并使测试失败。

理想情况下，电流同时注入所有间隔，但这并非总是可行，具体取决于间隔的数量和可用测试仪。但是，已经有两个六相测试仪可以输出到三个馈线间隔和一个耦合间隔中，从而能够运行几乎所有重要的测试用例。在所有馈线间隔成功通过后，测试仪可以连接到其他间隔单元。根据变电站设计和分布式保护的情况，间隔单元可能彼此相距几米。由此产生了测试系统的关键特性：

- 模拟隔离开关状态。

- 计算测试序列中每个测试步骤和每个状态的所有测试仪电流。
- 控制多个时间同步测试仪。

如果没有基于系统的测试解决方案，这通常通过设置电子表格来实现。每一行或测试步骤有多个列，这些列会定义隔离开关状态和间隔电流。执行操作时，可以通过桥接间隔单元的开关量触点或使用定制配电盘，根据当前行模拟隔离开关位置。如果有多个测试仪，电流会被传输到一个或多个序列发生器文件。创建此类电子表格并进行执行会非常耗时。工作量会随着总线的大小呈指数增长。其中一个非技术性的问题在于，这些电子表格不太容易理解。通常，会由测试工程师将真实场景转换为电子表格来进行准备。如果该领域的技术人员是另一个人，并尝试理解测试步骤，他将电子表格转换回其熟悉的真实场景。这种固化思维与效率低下相对应，是潜在的错误来源。

系统测试工具可以成为解决这一问题的综合解决方案。要对电力系统进行建模，可以使用单线线路编辑器编辑母线拓扑，包括 CT 比率和理想情况下的馈线短路电流。定义测试步骤的所有工作现在都可以在单线线路中完成。

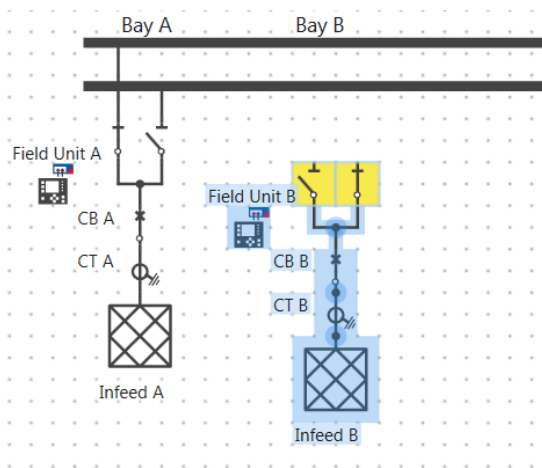


图 3：单线线路编辑器

### A. 隔离开关模拟

在测试用例中，可以在编辑器中直接操作隔离开关。这样电力系统仿真将模拟正确的均流。此外，基于系统的测试解决方案，可以将隔离开关的双位置映射到测试仪的开关量输出。在执行测试步骤之前，软件将根据定义的隔离开关位置设置测试仪的所有开关量输出。这样，无需在每个测试步骤前手动桥接隔离开关触点，即可实现测试全自动化，从而减少错误来源并提高效率。如果所有隔离开关都通过测试解决方案模拟，则将需要很多输出。因此，一些测试仪可以很容易地用开关量输出进行扩展，而成本只是额外测试仪的一小部分。

### B. 电流计算

电流计算非常省力并且是恒定的，无论拓扑结构多么复杂。通过改变电力潮流、设置故障和在软件内添加断路器事件，电力系统可以模拟一次性计算出所有 CT 位置的电流样本。

### C. 同时使用多个测试仪

在计算得出电流信号后，其会被传输到一个或多个测试仪。之后，软件将设置执行开始时间。由于所有测试仪均采用时间同步方式，因此同步将同时开始执行。执行后，测试仪会将所测量到的开关量事件发送回软件，在其中对事件进行评估。所有这些步骤均可由一个软件控制，只需单击执行按钮即可开始。每个测试仪都不需要用户协调或单独的测试文档。

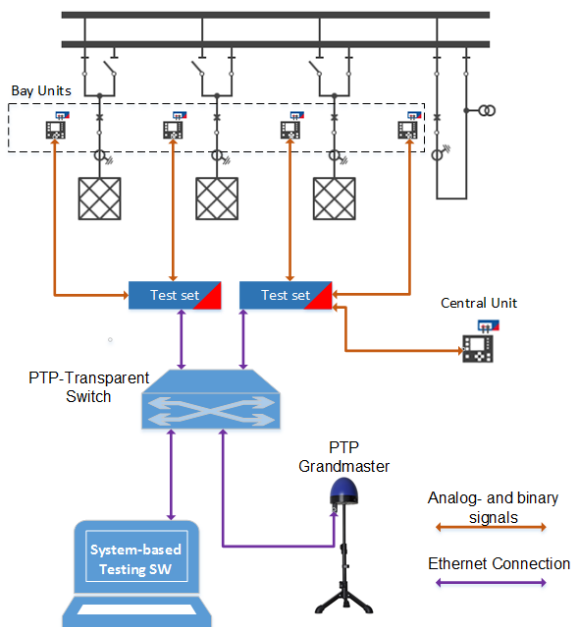


图 4 基于系统的母线保护测试的测试仪

使用多个测试仪时，需要进行时间同步。执行同步造成的每次时间延迟都会导致测试仪电流之间的相移，即使在正常的电力潮流下，该相移也会最终使差动元件跳闸。为了避免每个测试仪繁琐的 GPS 天线设置，可以将测试仪连接到启用 PTP 的以太网网络。该设置只需一个连接到特殊开关的参考 PTP 主时间源（透明时钟）。可以在此处将时间分配给所有测试仪。同时，该网络可用于在基于系统的测试软件与测试仪之间进行通信。

### D. 测试复杂逻辑序列

在很多测试步骤中，对保护命令作出反应很重要。当发出跳闸命令时，断路器必须在模拟范围内开路，且不必模拟电流。同样，模拟必须再次保持一致。若非如此，它将被视为断路器故障，并且无法执行在第一次跳闸后将变为激活的逻辑。模拟对被测系统的指令作出反应的能力通常称为实时闭环。但实时模拟系统只适用于实验室，需要专家知识和较高的资金投入，而测试仪则可以广泛分布使用的。对硬实时的一种合适替代方法是使用迭代闭环算法。将该算法应用于母线故障的模拟时，第一次迭代在没有任何 CB 命令的情况下被注入。尽管如此，保护将通过测试软件记录的跳闸命令对故障作出响应。由于我们假设继电器在与上次注入相同的电流波形下以相同的跳闸时间响应，因此我们将在预期跳闸后不久，在断路器开路事件之后，在一开始注入相同的电流波形。当另一个跳闸或合闸命令被发送时（这并非先前模拟的一部分），执行第三次迭代，其中包括两个断路器事件。该算法一直持续到保护不再发送新的未知跳闸或合闸命令为止。最后一次迭代会得到与实时模拟器相似的结果。使用该方式的好处在于，测试逻辑会变得非常简单。确定故障后，迭代闭环将进行接管。图 5 所示为有两次迭代的示例。

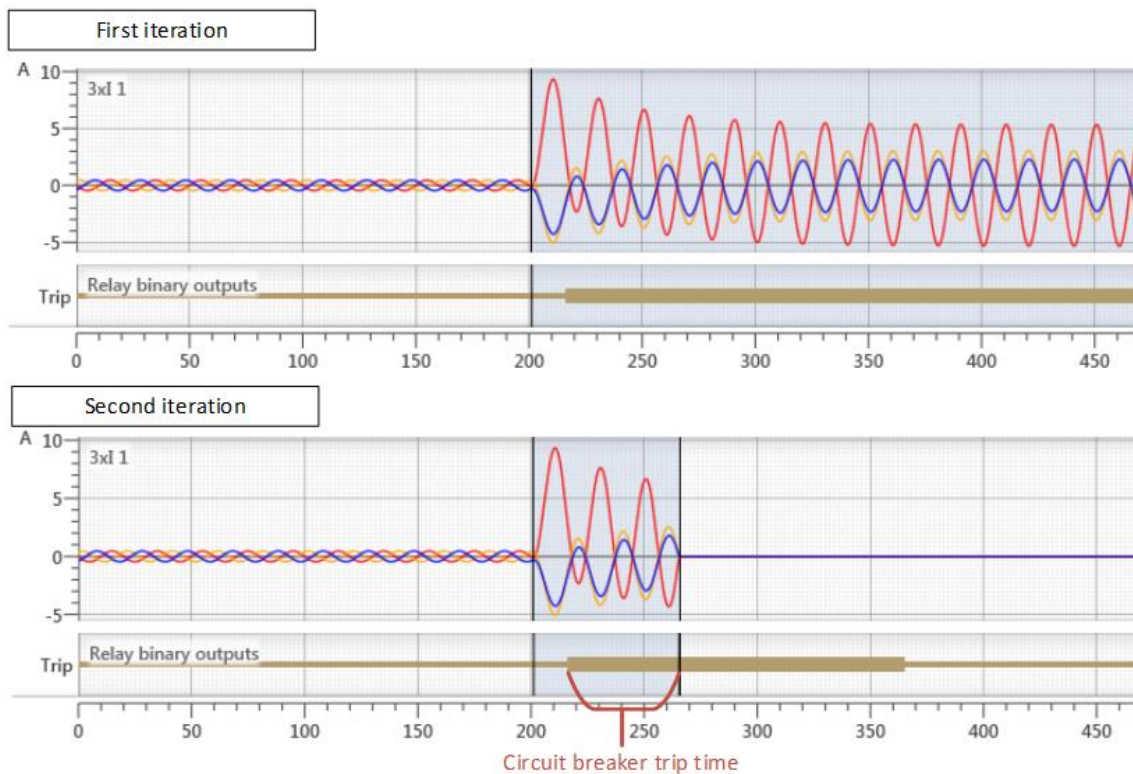


图 5：迭代闭环序列示例

### III. 现实应用

在过去三年中，我们积累了大量经验，能够采用专用的系统测试解决方案测试母线保护，详见 [4] 和 [5]。在本文中，我们希望强调系统测试的重要性，因此总结了在几次现场和工厂测试中发现的一些错误。在多数情况下，测试工程师或技术人员是第一次使用基于系统的方法，这就是通常用成熟的测试工具和方法对保护进行测试的原因。因此可以说，如果没有基于系统的测试工具，大多数错误都不会被发现。回顾一下，我们在这里描述的所有错误也可以通过传统的测试工具找到，但是我们发现，基于专用系统的测试解决方案的简便性对质量有着积极的影响。创建和运行测试用例如同拖动一个故障并按下执行般简单，测试人员也能以更深入的方式执行更多测试。

#### A. 死区中的错误

对于耦合间隔中的 100% 选择性，通常会在 CB 的每侧安装两个 CT，以便令总线选择性区域重叠。由于经济原因，通常只安装一个 CT，在 CT 和 CB 之间形成所谓的死区。现代母线保护具有特殊的逻辑，通过测量耦合 CB 状态位来检测死区内的故障。对于双母线拓扑的母线保护的调试，定义了一个测试用例，该测试用例应

验证当耦合 CB 打开时死区中的故障是否仅导致母线 B 的瞬时跳闸。（如果 CB 关闭，母线 A 将跳闸，之后则是母线 B）。测试中保护未经选择地跳闸。在母线保护的设置内解决了该错误。

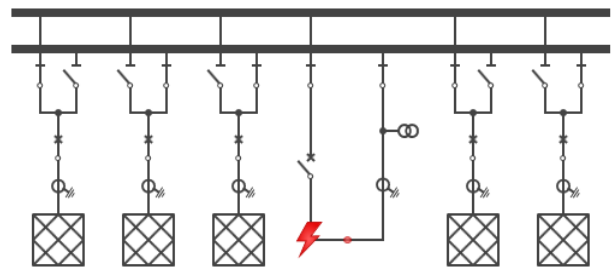


图 6：死区中的故障

#### B. 耦合间隔中的两个现场装置

在带有附加传输总线的双总线拓扑的分布式母线保护中发现以下错误。由于第一间隔单元的输出有限，在耦合间隔中安装了第二间隔单元。在调试期间，带死区故障的测试案例最初失败。由于配置原因，两个间隔单元都必须提供 CB 状态位，但只有一个间隔单元连接到

CB 状态触点。通过将 CB 状态触点也连接到第二个单元解决了该问题。

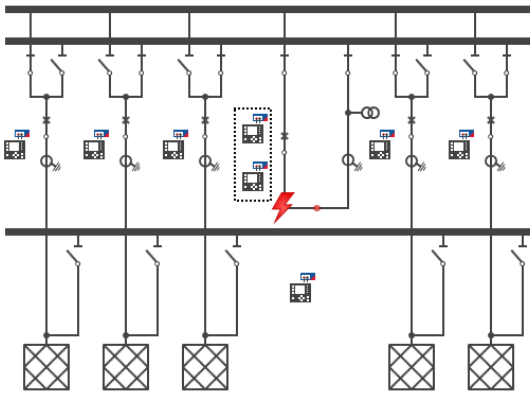


图 7 耦合间隔中的两个间隔单元

### C. BF 命令上的意外跳闸

以下错误是在测试实验室验证保护概念时发现的。被测系统由低阻抗母线保护和专用馈线保护继电器组成。在测试用例中，模拟了差分区域之外的故障。虽然该故障应由馈线保护处理，但母线保护在馈线拾取时立即启动内部 BF 计时器。由于基于系统的测试还模拟了 CB 跳闸延迟，发现 BF 定时器设置中没有足够的安全裕度，可能导致母线的非选择性跳闸。

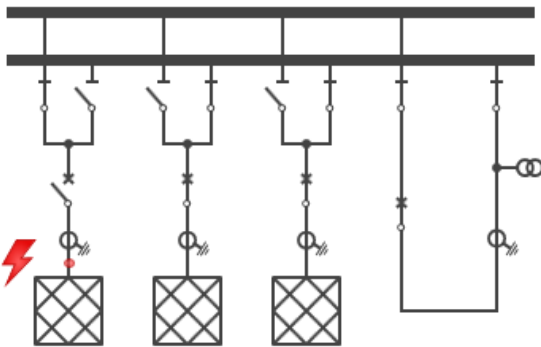


图 8：外部故障

### D. 零序电流输入接线错误

在分布式网络双母线的母线保护中，发现了以下错误。电力系统在低阻抗接地的情况下运行，导致相对地的小电流故障。在默认的差动元件中，这样的小故障电流会受到完整三相负载电流的过度限制。公用设施通过选择具有零序电流 ( $I_N$ ) 专用百分比限制特性的母线保护解决了这个问题。经由连接至 Holmgreen 电路的单独电流输入对  $I_N$  进行了测量。一个基于系统的测试实例表明，外部相对地故障会导致非选择性母线跳闸。这是由错误的  $I_N$  电流输入极性所造成。在此之前，并非基于系统的测试没有发现这个错误，因为只用一个注入电流对每个间隔进行测试。

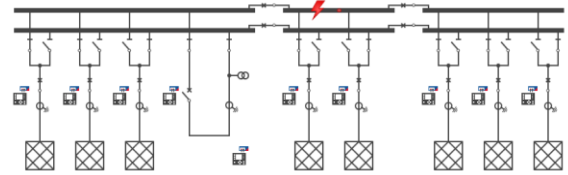


图 97 中间部分的母线故障

## IV. 结论

实践证明，系统测试是现代母线保护测试的必要措施。基于系统的专用测试解决方案能够大大简化执行此类测试的工作。

## V. 参考书目

- [1] G. Ziegler, Numerical Differential Protection: Principles and Applications (数字差动保护：原理与应用), Erlangen: Publicis Publishing, 2012.
- [2] Siemens, SIPROTEC 7ss52x 手册, Siemens, 2004.
- [3] 保护系统误操作工作组, “Misoperations Report “ (误操作报告), North American Electric Reliability Corporation (NERC), 亚特兰大, 2013.
- [4] C. Pritchard 和 T. Hensler, “Test and verification of a busbar protection using a simulation-based iterative closed-loop approach in the field” (采用基于模拟的迭代闭环方法的母线保护现场测试和验证), Australian Protection Symposium, 悉尼, 2014.
- [5] F. Fink, J. Köppel 和 T. Hensler, “Effective commissioning of busbar protection systems using a dynamic simulation in the field” (在现场使用动态模拟有效调试母线保护系统), Development in Power System Protection 2016 (DPSP), 伯明翰, 2016.