

電氣安全測試儀驗證 確保法規測試結果的有效性

電氣安全測試設備的驗證程序，往往是製造商最容易忽略的一環。然而，定期執行測試驗證，是確保安全測試設備能正確偵測產品失效、維持法規測試有效性的關鍵。

雖然建立測試驗證流程看似複雜，但只要具備適當的設備並建立標準化程序，即可讓整個驗證流程簡單、明確且容易執行。

為何需要進行驗證

國際安全認證機構，如 Underwriters Laboratories (UL)、Canadian Standards Association (CSA)、VDE、TÜV 及 International Electrotechnical Commission (IEC)，皆制定了相關安全標準，以確保電氣產品符合電氣安全要求。

執行電氣安全測試的目的，在於確認電子產品不會對最終使用者造成觸電風險。然而，電氣安全測試的可靠性，取決於所使用測試設備的準確性與正常運作。

在製造環境中，電氣安全測試儀可能因長期使用或外部因素而產生內部損壞，即使外觀沒有任何異常，也可能導致絕緣電阻、漏電流及耐壓等測試結果出現誤差。

因此，定期驗證電氣安全測試設備，可確保設備維持正常運作，並符合 NRTL（國家認可測試實驗室）的測試要求，進而提升電氣安全測試結果的可靠性與法規符合性。

根據 UL Mark Integrity Program 文件《Equipment Used for UL/C-UL/ULC Mark Follow-Up Services》的規定，所有量測與測試設備均須定期進行功能檢查。

其中明確指出：

用於確認產品符合 UL 要求的檢驗、量測與測試設備（IMTE, Inspection, Measuring and Test Equipment），應由使用單位每日進行功能檢查，以確保設備運作正常。若設備並非每日使用，則應於每次使用前完成功能驗證。〔1〕

上述內容說明了維持與驗證量測設備（包括電氣安全測試儀）功能正常的重要性。這項規範也是要求電氣安全測試設備必須定期執行驗證的主要依據。

常見的電氣安全測試：常用測試項目簡介

為了確保電氣產品在使用上的安全性，產品必須經過一系列嚴格的測試。其中，**電氣安全測試**主要用於驗證產品本身的電氣完整性與安全性能，確認產品在正常使用及特定條件下不會對使用者造成電氣危害。

常見的電氣安全測試包括：

- 接地導通（Ground Bond／Continuity）測試
- 耐電壓（Dielectric Withstand／High Potential，Hipot）測試
- 絕緣電阻（Insulation Resistance）測試
- 漏電流（Leakage Current）測試

每種測試都有其特定的測試條件與判定標準，目的在於檢測不同類型的潛在電氣安全問題。

表 1 彙整了多項 NRTL 標準中常見的耐壓測試設定。

Standard / Harmonized Standard	Testing Type	DIELECTRIC WITHSTAND		
		Test Voltage	Max I.	Test Time
IEC/UL 60601-1 3rd Edition Medical Electrical Equipment	Performance	500 – 4000 VAC or 707 – 5656 VDC	No Breakdown	60 s
	Production	1000 – 3000 VAC		1 or 60 s
IEC 61730-2 UL 1703 Photovoltaic Modules & Panels	Performance	1000 VAC + 2 x rated V or 2000 VAC + 4 x rated V	50 uA	60 s
	Production	1000 VAC + 2 x rated V or (1000 VDC + 2 x rated V) X 120%	50 uA	1 or 60 s
IEC 60335-1 Household Electrical Appliances	Performance	500 – 2400 VAC x rated V + 2400 VAC	No Breakdown	60 s
	Production	400 – 2500 VAC	5-30 mA	1 s
UL 60335-1 Household Electrical Appliances	Performance	500V – 2400 VAC x rated V + 2400 VAC	No Breakdown	60 s
	Production	400 – 2500 VAC	5-30 mA	1 s

Table 1 NRTL 常見的 Hipot 設定

接地導通測試（Ground Bond Test）

接地阻抗測試（Ground Bond Test）或接地導通測試（Ground Continuity Test），主要用於檢驗電氣設備保護接地（Safety Ground）的完整性與可靠性。

當產品因元件故障或絕緣失效而發生異常時，保護接地必須能夠承受可能產生的故障電流，並提供一條低阻抗的接地路徑，故障電流便能順利流向接地，使保險絲等保護裝置及時動作，切斷電源，以降低觸電及設備損壞的風險。

為了確保此保護機制能夠正常運作，產品所有可觸及的導電金屬部件，都必須與產品的接地插腳或接地端子保持良好的導通性。

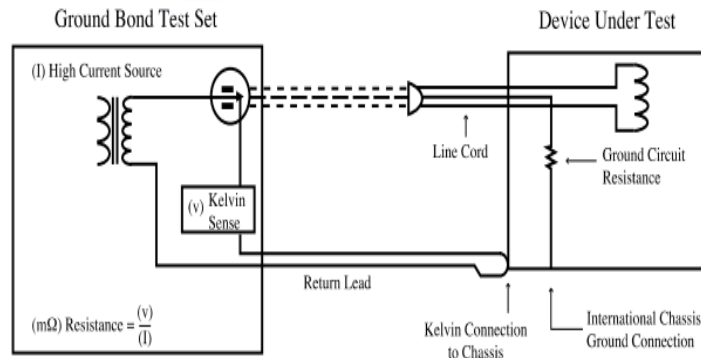


Figure 1: Circuit for a Ground Bond Test

圖 1 為典型的接地阻抗（Ground Bond）測試電路。測試時，接地阻抗測試儀會將測試電流注入產品的接地腳，並透過機殼或外露的金屬部件尋找回流路徑。在施加測試電流的同時，儀器會量測保護接地回路上的電壓降，並據此計算接地回路的阻抗，以評估保護接地的導通性能是否符合安全要求。常見的接地導通測試條件包括：測試電流為 10~30 A，接地回路阻抗不得超過 100~200 mΩ，且電壓降通常不得超過 6~12 V。

介電耐壓測試（Dielectric Withstand Test）

介電耐壓測試（Dielectric Withstand Test），通常稱為高電位測試或耐壓，是一項用於評估電氣產品安全性的測試。其目的在於對產品的絕緣系統施加高於正常工作電壓的測試電壓，以驗證絕緣材料是否具備足夠的耐受能力。如果產品的絕緣系統能夠在短時間內承受遠高於正常工作條件的高電壓而不發生絕緣擊穿或失效，則在額定工作電壓下即可合理預期能維持正常運作，並降低因絕緣故障而導致使用者觸電的風險。

耐壓測試是一項用途廣泛的電氣安全測試。除了可用於檢測絕緣系統中的薄弱點外，還能發現多種潛在的安全缺陷，例如過高的漏電流、製造瑕疵（如針孔、刮傷）、導體與接地部位之間間距不足，以及因環境因素造成的絕緣劣化等問題。

由於耐壓測試具有廣泛的檢測能力，能有效識別多種絕緣缺陷，因此多數國家認可測試實驗室（NRTL）均將其列為產品 100% 生產線（Production Line）必須執行的電氣安全測試項目。

耐壓測試的原理是在產品的載流導體與導電機殼之間施加高電壓，其中機殼作為電流的回流端。測試過程中，耐壓測試儀會量測流經絕緣系統的漏電流，藉此判斷產品的絕緣性能是否符合安全要求。

耐壓測試所施加的測試電壓會依據不同安規標準而有所不同，但常見的設定方式是依照下列公式計算：

$$\text{測試電壓} = 2 \times \text{產品額定電壓} + 1000 \text{ V}$$

耐壓測試電路通常可利用一個等效電路模型來表示，其主要由設備寄生電容（**Device Capacitance, C**）、絕緣電阻（Insulation Resistance, R_L ）以及少量接觸電阻（Contact Resistance, R_A ）所組成，如圖 2 所示。

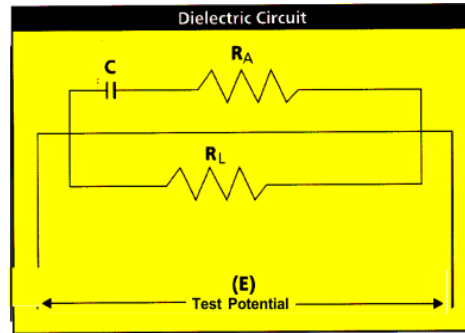


Figure 2: Dielectric Withstand Circuit Diagram

絕緣阻抗測試（Insulation Resistance Test）

絕緣阻抗測試（IR）雖然不是最常被安規標準要求的電氣安全測試項目，但能提供具有參考價值的定量測試數據，作為評估產品絕緣性能的重要依據。與耐壓測試主要量測漏電流（Leakage Current）不同，絕緣電阻測試則可直接量測產品的絕緣電阻值，以更直觀地評估絕緣材料的絕緣品質與劣化程度。

絕緣電阻測試可直接量測絕緣系統本身的電阻值。依據安全認證機構的規範，絕緣電阻測試所使用的測試電壓通常設定為 500 VDC 或 1000 VDC。

由於此測試採用直流（DC）電壓，當絕緣系統中的電容性部分完成充電後，流經絕緣層的漏電流將主要由電阻性漏電流所構成。因此，測試人員可以進一步取得絕緣系統的實際絕緣電阻值。

絕緣電阻（IR）測試的執行方式與 Hipot 測試相當類似。會將高電壓施加於產品的載流導體，並將測試回路的回流端連接至產品機殼。例如，對太陽能板進行 IR 測試時，會先將正極與負極端子短接後施加高電壓，並將回流端連接至金屬框架。透過此方式，可對絕緣系統施加測試應力，同時由絕緣電阻測試儀量測流向外露金屬機殼的漏電流，以評估產品的絕緣性能。

IR 測試通常應用於維修後設備的絕緣性能確認，或耐壓測試之後執行，用以確認 Hipot 測試所施加的高電壓並未造成絕緣系統損傷。

漏電流測試（Leakage Current Test）

漏電流測試與耐壓測試類似，都是量測流經產品絕緣層內部或沿絕緣表面流動的電流。兩者之間存在重要差異。漏電流測試是在產品以額定工作電壓（Rated Voltage）運作時進行量測或在上限電壓條件下，即額定電壓的 **110%** 情況下進行測試。相較之下，Hipot 測試是在產品未正常運作的狀態下施加高測試電壓，以評估絕緣耐受能力。另一項主要差異在於漏電流的量測方式。對於耐壓測試而言，漏電流是透過測試回路回流端上的電流感測電阻進行量測，如圖 3 所示。

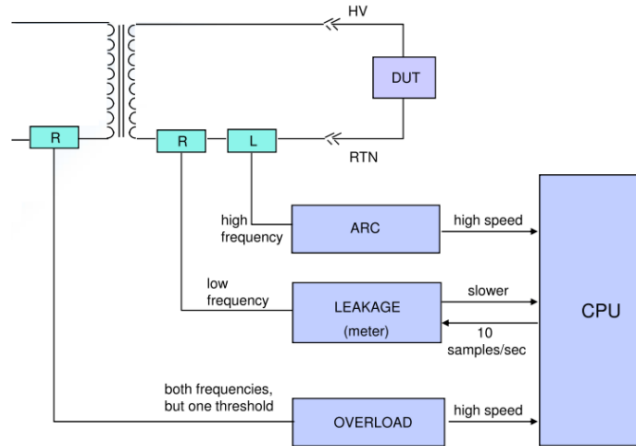


Figure 3: Hipot Detection Circuits

在漏電流測試過程中，漏電流是透過稱為量測裝置（Measuring Device，簡稱 MD）的測試網路進行量測。圖 4 顯示了一個典型的 MD 範例。

MD 的設計目的，是用來模擬人體阻抗特性（**Human Body Impedance**），藉此評估產品在正常使用條件下，當使用者接觸產品時可能承受的漏電流大小，並判斷其是否符合相關電氣安全標準的要求。

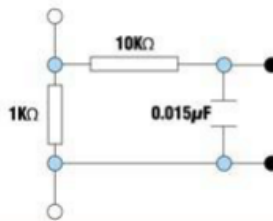


Figure 4: 60601-1 Measuring Device

漏電流測試與其他電氣安全測試的另一項主要差異，在於其測試過程包含故障條件的驗證。這些故障條件的設計目的，是模擬產品在實際運作期間可能發生的「最嚴苛情境」，以評估設備在異常狀況下的安全性能。最常見的三種故障條件包括：

- 中性線開路（Opening of the Neutral Circuit）
- 電源極性反接（Reversal of Line Polarity）

- 接地回路開路 (Opening of the Ground Circuit)

圖 5 顯示了一個典型的漏電流量測網路 (Leakage Current Network)。

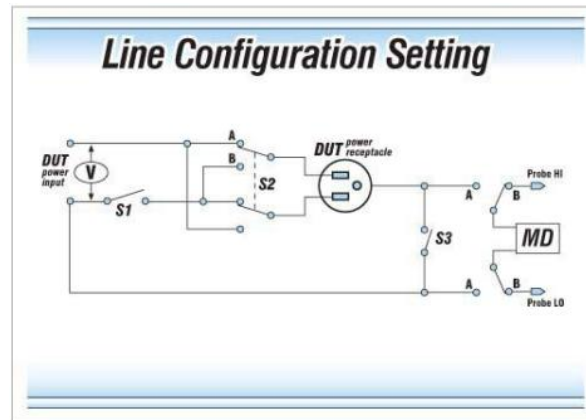


Figure 5: Leakage Current Configuration

開關 S1 代表中性線故障條件 (Neutral Fault Condition) 的模擬，開關 S2 代表電源極性反接 (Polarity Reversal) 的模擬，而開關 S3 則代表接地開路條件 (Open Ground Condition) 的模擬。

在不同故障組態下執行測試的目的，是為了精確評估產品在運作期間遭遇各種異常狀況時，人體可能接觸到的漏電流大小。透過模擬一系列可能發生的故障情境，可確認產品在非正常操作條件下的安全性能。

如果產品在所有相關故障條件下所量測到的漏電流值皆維持在足夠低的範圍內，則可合理確保產品在整個使用壽命週期中均能正常運作，並不會對使用者造成觸電危害。

漏電流測試的判定參數會依據不同安全標準而有相當大的差異。目前最常見的漏電流測試之一，是用於符合 **60601-1 第三版醫療設備標準** 的要求。依據此標準，漏電流測試必須在額定線電壓的 110% 條件下執行，並使用符合 **60601-1 規範的量測裝置 (MD, 圖 4)**，可接受的漏電流範圍會依產品分類與應用條件而有所不同，其限制值可能從 **10 μ A** 到 **10 mA** 不等。

測試驗證的重要性 (The Importance of Test Verification)

耐壓、接地阻抗、絕緣阻抗以及漏電流測試功能，通常會整合於多功能測試設備中，或整合於單一的綜合型安全測試儀內。由於此類測試設備具備多種測試功能，因此確認測試儀在超出規範設定值時，是否能夠正確判定失敗，是非常重要的。在高產量的生產線環境中，若測試設備未能正常運作，可能導致應判定為不合格的產品未被有效篩出。

上述案例僅說明了其中一種可能發生的情況。其他潛在風險還包括嚴苛的環境條件，例如高溫與高濕度環境。長時間處於此類環境下，可能會影響測試儀器的量測結果與準確度。若測試設備的實際準確度偏離規定的量測精度範圍過大，則可能導致受測產品被錯誤判定為合格或不合格。透過每週或每日針對完整產品測試項目執行測試驗證，可確保量測電路中可能存在的問題能夠被即時發現。採取簡單且定期的驗證措施，可以避免後續產生更嚴重的問題，甚至降低產品召回的風險。雖然建立驗證流程可能需要初期投入額外的時間與資源，但相較於測試失效可能造成的損失，其投入成本通常是值得的。

電氣安全測試工作站的高效率驗證流程

例行性的產品安全測試，主要用於識別可能造成安全風險的問題，包括絕緣失效、接地不良、連接鬆脫、元件故障、設備內部接地異常、未防護的帶電部件，以及可能導致觸電危害的過高漏電流。僅透過在測試端子之間建立短路或開路狀態，即可作為一種有效的方法，用來確認測試儀器的基本失效判定功能是否正常運作。這類簡單的方法並無法檢測設備可能存在的所有潛在問題。

透過配置簡易的電阻網路與繼電器，可提供操作人員一種方便的方式來確認測試設備功能是否正常。其原理是利用這些電阻網路產生特定的電壓降，並設定測試判定限制，使驗證測試能夠刻意觸發失敗結果，以確認儀器的判定功能正常。此外，若將此類驗證網路設計為具備易於連接的介面端口及可程式化控制功能，便可在每次驗證流程中自動執行測試，提高驗證效率與一致性。

為操作人員與技術人員提供簡單易用的驗證方式，可提高設備量測異常問題在產品測試前被發現的機率。圖 7 顯示了一種專門用於測試驗證的驗證盒（Test Box）。



Figure 7: Associated Research TVB-2 Test Verification Box

以圖 7 所示的 TVB-2 為例，可以建立一套簡單但有效的驗證流程，並安排每日執行，以確認電氣安全測試設備的功能是否正常。

此驗證盒由一系列電阻元件所組成，透過設計特定的電阻值，使其能產生預期的漏電流大小或呈現設定的阻抗值。以下範例說明各類電氣安全測試項目的驗證方法。

TVB-2 驗證盒針對每一種安全測試功能，均設有兩個測試端子：一個用於模擬通過條件，另一個用於模擬失敗條件。此設計是透過在各測試端子與驗證盒的 RETURN（回流）端子之間連接不同阻值的電阻，以產生對應的測試結果。各測試項目所對應的 TVB-2 設定值，請參閱表 2。

	ACW	DCW	IR	GC	GB
PASS	2MΩ	2MΩ	4MΩ	500mΩ	50mΩ
FAIL	120kΩ	120kΩ	1MΩ	2Ω	200mΩ
Instrument Settings	1240 V 10mA	2121V 5000uA	500V 2MΩ	1Ω	30A 100mΩ
Ramp	2s	2s	N/A	N/A	N/A

Table 2: TVB-2 Box Resistance Values and Test Settings

耐電壓測試驗證 (Dielectric Withstand Verification)

當耐壓測試的設定測試電壓為 1240 VAC。根據表 1 的資料，FAIL 驗證電路包含一個 120 kΩ 電阻，而 PASS 驗證電路則採用 2 MΩ 電阻。

因此，耐壓測試儀需要設定兩組不同的驗證測試。第一組為 PASS 驗證測試。耐壓測試儀設定條件如下：

- 測試電壓(Voltage)：1240 VAC
- 漏電流上限(Hi-limit)：10 mA
- 緩升時間 (Ramp Up Time)：2 秒
- 測試時間 (Dwell Time)：1 秒

測試時，將耐壓測試儀的高壓測試線連接至 TVB-2 驗證盒中 ACW/DCW 區域的 PASS 端子，並將回流測試線連接至 TVB-2 驗證盒的 RETURN 端子。

透過簡單的歐姆定律計算，可得知預期漏電流值約為 620 μA：

$$\text{漏電流} = 1240\text{V} / 2,000,000\Omega = 0.00062\text{A}$$

此測試結果應判定為 PASS（通過）。接下來進行 FAIL（失敗）驗證測試。耐壓測試儀維持與 PASS 測試相同的設定參數，然後將高壓測試線由 TVB-2 驗證盒 ACW/DCW 區域的 PASS 端子移至 FAIL 端子。執行測試後，預期量測到的漏電流應約為 10.3 mA。由於此數值超過耐壓測試儀設定的漏電流上限，因此測試結果應正確判定為 FAIL（失敗）。

$$\text{漏電流} = 1240\text{V} / 120,000\Omega = 0.01033\text{A}$$

為符合相關認證機構規範要求，測試結果應在保持時間（Dwell Time）週期的 **0.5 秒內**判定為失敗。如果測試未能在規定時間內判定失敗，表示測試儀器可能無法正確量測漏電流，該設備應進行維修或重新校正。

接地阻抗測試驗證 Ground Bond Verification

當接地導通測試的測試電流設定為 25 A AC。根據表 1 的資料，FAIL 驗證電路包含一個 200 mΩ 電阻，而 PASS 驗證電路則採用 50 mΩ 電阻。

因此，接地阻抗測試儀需要設定兩組不同的驗證測試。第一組為 PASS 驗證測試。接地阻抗測試儀設定條件如下：

- 測試電流(Current)：25 A AC
- 阻抗上限(Hi-limit)：100 mΩ
- 測試時間（Dwell Time）：1 秒

測試時，將接地阻抗測試儀的大電流測試線（紅色線）連接至 TVB-2 驗證盒中 GB 區域的 PASS 端子，並將回流測試線（黑色線）連接至 TVB-2 驗證盒的 RETURN 端子。執行測試後，預期量測到的電阻值應約為 50 mΩ，此結果應判定為 PASS（通過）。接下來進行 FAIL（失敗）驗證測試。接地阻抗測試儀維持與 PASS 測試相同的設定參數，然後將大電流測試線由 GB 區域的 PASS 端子移至 FAIL 端子。執行測試後，預期量測到的電阻值應約為 200 mΩ，此結果應立即判定為 FAIL（失敗）。

為符合相關認證機構規範要求，測試應在保持時間（Dwell Time）週期的 **0.5 秒內**判定失敗。如果測試未能判定失敗，表示測試儀器可能無法正確量測接地回路阻抗值，應進一步分析設備狀態，以確認是否存在異常。

絕緣阻抗驗證 (Insulation Resistance Verification)

測試範例所使用的絕緣電阻 (IR) 測試電壓為 500VDC。參考表 1，Fail (失敗) 電路包含一個 4MΩ 電阻，而 Pass (通過) 電路則使用一個 1MΩ 電阻。

絕緣電阻測試儀 (IR instrument) 需要設定兩組不同的測試條件。

第一組測試為 PASS 測試：

- IR 測試儀設定：
 - 測試電壓：500VDC
 - 下限值 (Low Limit)：2MΩ
 - 升壓時間 (Ramp Up)：2 秒
 - 測試時間 (Dwell Time)：1 秒

將 IR 測試儀的高壓測試線 (High Voltage Lead) 連接至 TVB-2 箱體 IR 部分的 PASS 端子，並將回路線 (Return Lead) 連接至 TVB-2 的 RETURN 端子。執行測試時，量測到的電阻值應約為 1MΩ，因此測試結果應判定為 PASS (通過)。

第二組測試為 FAIL 測試：

IR 測試儀維持與 PASS 測試相同的設定參數。接著，將高壓測試線移至 TVB-2 IR 部分的 FAIL 端子。執行測試時，量測到的電阻值應約為 4MΩ，並應立即判定為 FAIL (失敗)。

為符合相關法規機構的規範要求，測試結果必須在測試時間 (Dwell Cycle) 的 0.5 秒內判定失敗。如果測試未能判定 FAIL，表示設備可能未能正確偵測漏電流，此時應進一步分析設備狀況。

漏電流驗證 (Leakage Current Verification)

Leakage Current verification is not as well defined as verification for other test types. The TVB-2 box does not contain terminals to test for leakage current values. However, the same concept can be carried over to ensure that a Leakage Current instrument is operating within specified values. Since a product is operating at rated voltage while running a Leakage Current test, most Leakage Current instruments include a universal power receptacle (figure 8).

漏電流驗證不像其他測試類型的驗證方式那麼明確定義。TVB-2 測試盒並未包含可用於測試漏電流數值的端子。然而，相同的驗證概念仍可延伸應用，以確認漏電流測試儀是否在規定的規格範圍內正常運作。由於產品在進行漏電流測試時，是以額定電壓運行，因此大多數漏電流測試儀都配備一個通用電源插座 (如圖 8 所示)。



Figure 8: Universal Receptacle Box

因此，可以製作一個簡單的治具，與該電源插座盒進行連接。使用一個標準電源插頭，並在插頭端接上兩種不同阻值的電阻，是建立漏電流驗證測試治具的一種簡單方法。

由於漏電流測試儀在正常極性條件下，是量測接地端（Ground）與中性線（Neutral）之間的漏電流；而在反向極性條件下，則是量測接地端（Ground）與火線（Line）之間的漏電流，因此可以分別在線對地（Line to Ground）以及中性線對地（Neutral to Ground）之間連接不同阻值的電阻。

例如，在進行漏電流驗證時，可製作一個測試插頭：

- 在線（Line）與接地（Ground）之間連接 2MΩ 電阻
- 在中性線（Neutral）與接地（Ground）之間連接 200kΩ 電阻

第一組漏電流測試設定如下：

- 測試電壓：120VAC
- 頻率：60Hz
- 漏電流上限（High Limit）：50μA
- 極性：反向極性（Reverse Polarity）
- 測試時間（Dwell Time）：5 秒

當在線（Line）與接地（Ground）之間連接 2MΩ 電阻時，漏電流讀值應約為 60μA：

$$\text{漏電流} = 120\text{V} / 2,000,000 = 0.00006\text{A}$$

此漏電流值應會導致測試結果判定為 FAIL（失敗）。

第二組測試則用於確認在正常極性（Normal Polarity）條件下，測試儀是否能正確判定失敗。

第二組漏電流測試設定如下：

- 測試電壓：120VAC
- 頻率：60Hz
- 漏電流上限（High Limit）：550 μ A
- 極性：正常極性（Normal Polarity）
- 測試時間（Dwell Time）：5 秒

當在中性線（Neutral）與接地（Ground）之間連接 200k Ω 電阻時，漏電流讀值應約為 600 μ A，因此測試結果應判定為 FAIL（失敗）。

雖然漏電流測試儀內部還包含其他各種繼電器等元件，但主要驗證概念是確認：當存在過高漏電流時，儀器內的漏電流偵測功能是否能正確觸發失敗判定。上述兩組測試可用來確認漏電流測試儀是否能正確量測漏電流值，並在超出規範範圍時做出正確判定。

結論

隨著微處理器技術導入電氣安全測試設備中，測試儀器的驗證設定變得越來越複雜。設備技術的整合與升級，使得現代儀器所需的測試驗證深度已超越傳統類比式設備。

電氣安全測試儀器內部通常包含用於保護設備電路的內建抑制器。然而，這些抑制器若發生損壞，也可能導致儀器產生錯誤讀值。透過執行簡單的每日驗證步驟，可以在後續避免大量的問題與額外工作，同時也有助於避免高成本的产品重新設計或產品召回。在電氣安全測試儀器的輸出端串聯一個電阻，可以協助驗證量測結果，並確認失效偵測功能是否正常運作。若進一步使用由多組已校準電阻值組成的驗證治具，則可提升驗證流程的完整性與可靠性。此外，微處理器控制的安全測試設備通常具備測試程序編輯與儲存功能。這些程序可以設定為包含操作指導文件以及資料收集功能。

驗證方法提供操作人員一種簡便方式，可儲存驗證測試流程，並每日執行設備有效性確認。定期執行驗證程序，可確保所有測試設備皆符合 NRTL（Nationally Recognized Testing Laboratory，國家認可測試實驗室）規範要求。

參考資料: [1] [UL Calibration Requirements: Equipment Used for UL/C-UL/ULC Mark Follow-Up Services](#)