



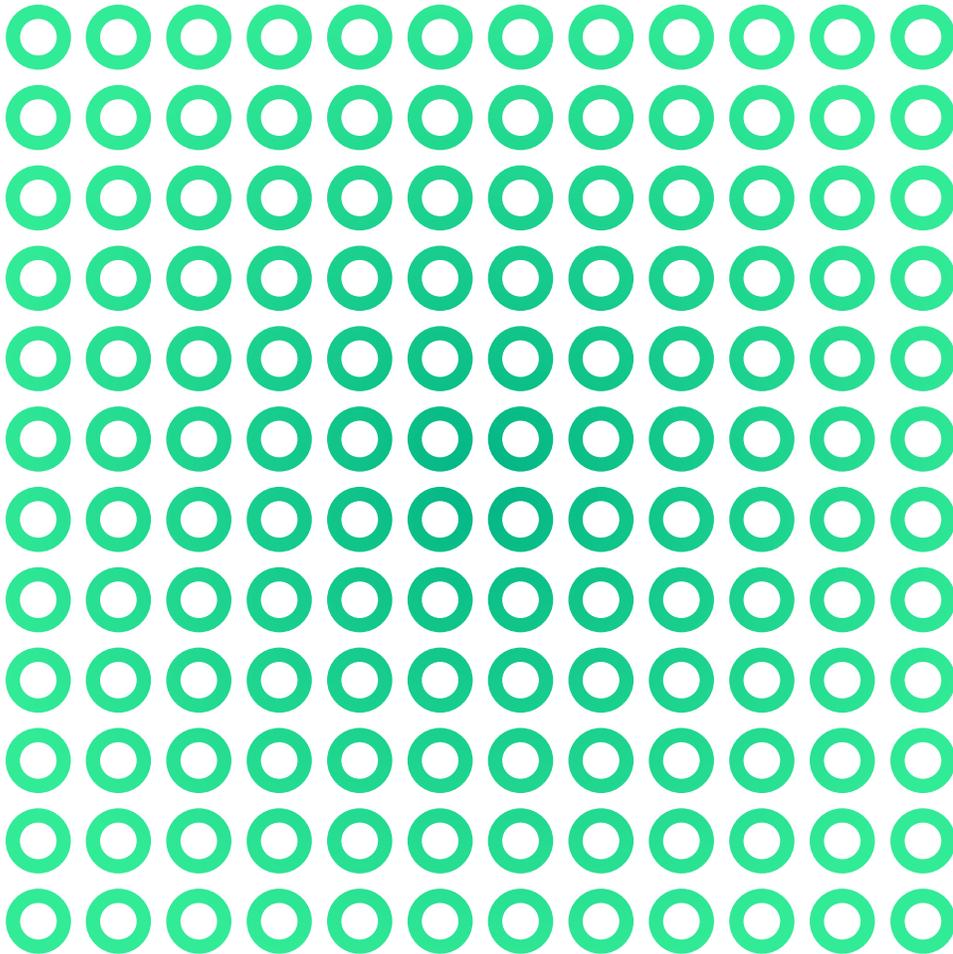
NI is now part of Emerson.



EMERSON™

백서

DC 측정 성능 극대화를 위한 실용 가이드





목차

03 개요

03 SMU 기본 사항

SMU 작동 이론

06 정확도

정확도 대 속도

펄싱

10 DC 측정의 모범 사례

도선 저항의 영향을 상쇄하기 위한 원격 감지의 사용

오프셋 전압의 보정

외부 노이즈의 최소화

누출 전류에 대한 보호

교정의 중요성 이해

19 결론

개요

정확한 DC 측정값을 얻는 것은 많은 사용 분야에서 공통으로 요구되는 사항이지만, 단순히 매우 정확하고 민감한 계측기를 구입하는 것만으로는 충분하지 않습니다. 많은 다양한 에러의 원인이 판독값의 정확도에 영향을 미칠 수 있습니다. 또한 계측기의 셋팅을 약간만 조정해도 다른 결과가 나올 수 있습니다. 최고 수준의 정확도를 얻으려면 다양한 방법을 사용하여 에러의 원인을 해결하면서 계측기를 철저히 이해해야 합니다.

이 가이드는 소스 측정 유닛(SMU)을 사용하여 DC 측정을 수행하는 방법을 보여 줍니다. 먼저 계측기의 기본 사항을 검토하고, SMU의 사용 방법을 학습하고, 계측기를 설정하는 데 도움이 되는 기능을 살펴봅니다. 그런 다음, 테스트 셋업에 적용하여 DC 측정을 수행할 때 발생하는 다양한 에러를 완화할 수 있는 주요 모범 사례를 살펴봅니다. 이 가이드에서는 일반적인 측정 시나리오의 맥락에서 이러한 모범 사례를 살펴봄으로써, 여기서 다룬 개념을 가장 효과적으로 적용할 수 있는 시기와 위치를 배울 수 있습니다.

SMU 기본 사항

SMU는 전압 소싱 및 측정 기능뿐만 아니라 전류 소싱 및 측정 기능을 제공하는 정밀 전력 소싱 계측기입니다. 이렇게 전압과 전류를 제어하면 옴의 법칙에 따라 저항과 전력을 유연하게 계산할 수 있습니다. 이러한 계측기는 양극성 전압과 전력 싱크 기능을 모두 포함하는 4개 사분면 출력을 제공합니다. 이러한 모든 기능 때문에, SMU를 사용하여 필요한 측정을 수행하는 방법을 이해하는 것은 어려울 수 있습니다.

SMU 작동 이론

SMU의 주요 특징은 4개 사분면 출력의 유연성입니다(그림 1). 출력은 양극 전압과 양극 전류, 음극 전압과 양극 전류, 음극 전압과 음극 전류, 또는 양극 전압과 음극 전류를 제공할 수 있습니다.

제1 사분면과 제3 사분면에서는 SMU가 전력을 소싱하며, 제2 사분면과 제4 사분면에서는 SMU가 전력을 싱킹합니다. 전력 소싱은 회로에 대한 자극을 의미하며, 전력 싱킹은 전압 조정기의 출력과 같은 외부 능동 부품에 의한 인가 전력의 소모를 의미합니다. 그림 1의 IV 경계는 실제 계측기의 IV 경계를 단순화한 것입니다. 실제 SMU는 펄싱 모드외의 경우 IV 경계를 확장합니다(펄싱 섹션 참조).

대부분의 SMU는 정전압 모드 또는 정전류 모드에서 작동할 수 있습니다. 정전압 모드에서 SMU는 전류 출력이 변하는 동안 출력 터미널의 전압을 일정하게 유지하는 전압 소스의 역할을 합니다. 이 모드에서는 SMU가 DUT(Device Under Test)에 너무 많은 전류를 공급하지 않도록 전류 리미트를 설정할 수 있습니다. 예를 들어, SMU가 20 kΩ 부하에 연결되어 있고 전류 리미트를 1.5 mA로 설정한 경우, 그림 2와 같이 전류 리미트에 도달하지 않으면서 0 V에서 20 V까지 전압을 스위칭할 수 있습니다.

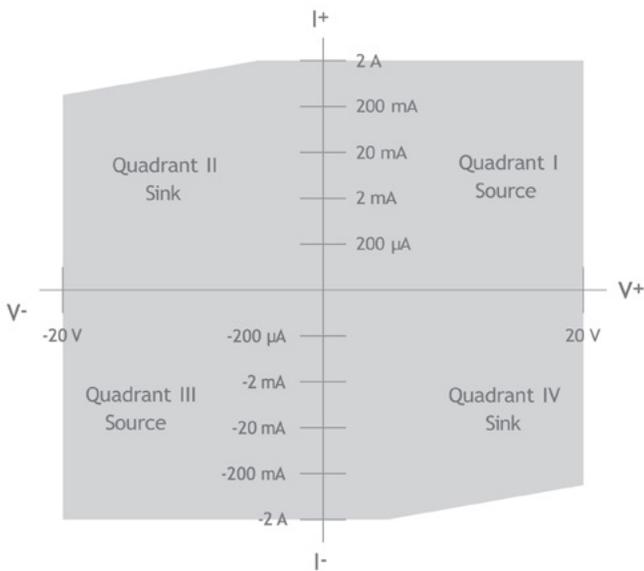


그림 1
단순화된 SMU의 IV 작동 경계

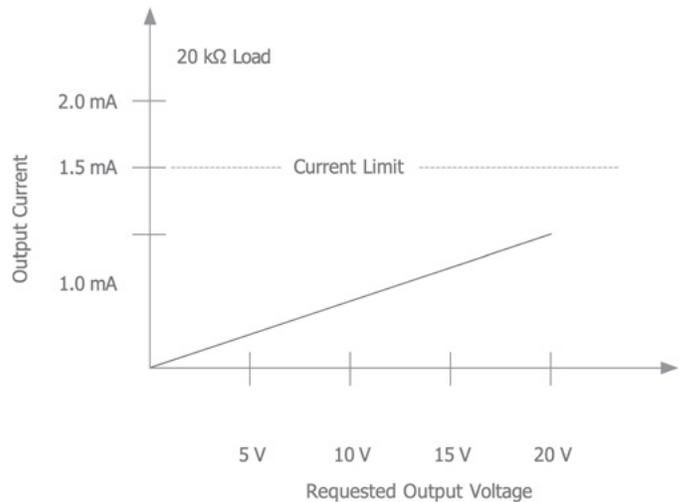


그림 2
20 kΩ 부하에 대해 전류 리미트가 1.5 mA로 설정된 상태로 정전압 모드에서 작동하는 동안의 SMU 출력

그러나 부하가 10 kΩ인 경우, 전류 리미트를 위반하지 않고는 0 V에서 20 V까지 전압을 스위칭할 수 없습니다. 옴의 법칙을 사용하여 SMU가 1.5 mA의 전류 리미트에 도달하는 시점을 계산할 수 있습니다.

$$V = IR$$

$$V = 1.5 \text{ mA} * 10 \text{ k}\Omega$$

$$V = 15 \text{ V}$$

이 계산에 따르면, 전압 출력이 15 V에 도달하면 SMU는 1.5 mA의 전류 리미트에 도달합니다. 이 전류 리미트에 도달하면 해당 채널은 규정을 준수하는 것입니다. 프로그래밍된 리미트에 도달했기 때문에 채널이 요청된 출력 레벨에 도달할 수 없는 경우, 해당 채널은 규정을 준수하여 작동하는 것입니다. SMU가 규정을 준수하여 작동하는 동안, 요청된 출력 전압이 15 V보다 크더라도 실제 출력 전압은 15 V를 초과하지 않습니다. 이 개념은 그림 3에 설명되어 있습니다. 일단 SMU 출력이 1.5 mA의 전류 리미트에 도달하면 규정을 준수하는 것입니다. 비록 요청된 전압이 15 V보다 높더라도 실제 전압은 15 V를 초과하지 않습니다. 이 기능은 SMU가 너무 많은 전력을 공급하여 DUT를 손상시키지 않도록 보장하는 데 매우 유용합니다.

SMU가 정전류 모드인 경우에도 비슷한 원리가 적용됩니다. SMU는 전류 소스로 작동하며, 전압이 변하는 동안 출력 터미널의 전류를 일정하게 유지합니다. 이 경우 전압 리미트를 설정할 수 있으며, 일단 채널이 이 리미트에 도달하면 해당 채널은 규정을 준수하는 것입니다.

SMU가 정전압 및 정전류 모드에서 작동하는 방식에 대해 이해한 바는 일반적인 측정 시나리오에 적용할 수 있습니다. 예를 들어, SMU로 전압을 측정하려는 경우, 디바이스를 전류 모드로 전환하고 가능한 최저 전류 범위를 사용하면서 전류 레벨을 0으로 설정할 수 있습니다. 이렇게 하면 SMU는 모듈을 통해 흐르는 전류를 최소화하면서 터미널의 전압을 감지할 수 있습니다. 이때 SMU는 사실상 고임피던스 부하로 작동합니다. 마찬가지로, SMU로 전류를 측정하려는 경우, 디바이스를 전압 모드로 전환하고 가능한 최저 전압 범위를 사용하면서 제로 볼트를 소싱해야 합니다. 이때 SMU는 사실상 단락 회로로 작동합니다. 이렇게 하면 SMU를 전압계 또는 전류계처럼 사용할 수 있습니다.

SMU를 전압계로 사용하는 경우:

- SMU는 DC 전류 모드로
- 최저 전류 범위로 설정
- 0 A 소싱

SMU를 전류계로 사용하는 경우:

- SMU는 DC 전압 모드로
- 최저 전압 범위로 설정
- 0 V 소싱

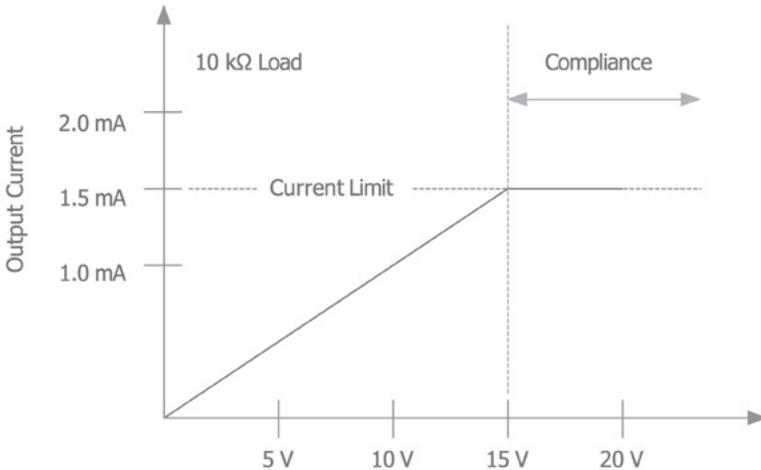


그림 3 10 kΩ 부하에 대해 규정 준수 작동을 보여주며 정전압 모드에서 작동하는 동안의 SMU 출력

정확도

SMU와 전원 공급 장치의 주요 차이점은 각각에서 달성할 수 있는 정확도의 레벨이 다르다는 것입니다. SMU를 최대한 활용하려면 정확도 스펙과 그 의미를 잘 이해하고 있어야 합니다. 대부분의 SMU는 정확도를 오프셋 에러와 게인 에러의 조합으로 설명합니다. 오프셋 에러는 단일 포인트에서 실제 출력과 이상적인 출력 사이의 차이를 의미하며, 게인 에러는 실제 전달 함수와 이상적인 전달 함수 사이의 기울기 차이를 나타냅니다. 주어진 측정값에 대한 전체 정확도 스펙을 결정하기 위해 이러한 두 에러가 합산됩니다. NI SMU에서 일반적으로 오프셋 에러는 절대 단위(mV 또는 μA)로 지정되며, 게인 에러는 판독값 또는 요청된 값의 퍼센트로 지정됩니다. 그 이유는 우선 오프셋 에러가 출력하려는 값과 관계없이 동일한 영향을 미치기 때문입니다. 그러나 게인 에러는 기울기의 차이를 나타내기 때문에, 에러의 크기는 출력값이 증가함에 따라 증가합니다.

5 mA 전류를 측정하기 위해 NI PXIe-4139 SMU의 스펙을 사용하는 정확도 계산의 예제를 살펴보겠습니다. 이 측정을 수행하려면 SMU에서 10 mA 측정 범위를 사용합니다. PXIe-4139 스펙에 따르면, 10 mA 범위에서 SMU의 정확도는 (판독값의 0.022 퍼센트) + 200 nA입니다. 이 정확도 스펙에서 0.022 퍼센트는 게인 에러에 해당하며, 200 nA는 오프셋 에러에 해당합니다. 이 두 가지를 합산하면 완전한 정확도 스펙을 얻을 수 있습니다.

$$\begin{aligned} \text{정확도} &= \text{게인 에러} + \text{오프셋 에러} \\ \text{정확도} &= (0.022\% * 5 \text{ mA}) + 200 \text{ nA} = 1.3 \mu\text{A} \end{aligned}$$

전류 판독값을 대입하면 정확도가 1.3 μA 임을 알 수 있으며, 이는 5 mA의 판독값이 실제 전류의 $\pm 1.3 \mu\text{A}$ 내에 있어야 함을 의미합니다.

계측기의 정확도에 영향을 미치는 주요 요인은 계측기 온도입니다. 이전 샘플 계산에서 사용된 정확도 스펙은 보드 온도가 마지막 자기 교정을 완료할 때 적용된 보드 온도의 1 °C 이내인 경우에만 유효합니다. 예를 들어, 자기 교정이 수행될 때 보드 온도가 25 °C인 경우, 정확도 스펙은 현재 보드 온도가 24 °C와 26 °C 사이인 경우에만 유효합니다.

보드 온도가 자기 교정 온도의 5 °C 이내인 경우, 게인 에러와 오프셋 에러가 모두 증가하며, 정확도 스펙은 (판독값의 0.03 퍼센트) + 600 nA가 됩니다. 이 새로운 스펙을 사용하여 5 mA 측정의 정확도를 다시 계산할 수 있습니다.

$$\text{정확도} = (0.03\% * 5 \text{ mA}) + 600 \text{ nA} = 2.1 \mu\text{A}$$

전류 판독값을 대입하면 정확도가 1.3 μA 임을 알 수 있으며, 이는 5 mA의 판독값이 실제 전류의 $\pm 1.3 \mu\text{A}$ 내에 있어야 함을 의미합니다.

이 작은 온도 차이로 인해 계측기의 정확도가 0.8 μA 만큼 감소했습니다. 하위 레벨의 전류 또는 전압을 측정하는 경우, 주기적으로 자기 교정을 수행하여 이러한 온도 영향을 보정해야 합니다([교정](#) 섹션 참조).

정확도 대 속도

SMU의 측정 속도는 애퍼처 시간을 사용하여 결정됩니다. 애퍼처 시간은 아날로그-디지털 변환기(ADC)가 SMU에서 전압 또는 전류를 읽는 기간입니다. 그림 4에서, 애퍼처 시간은 측정 기간이 지속되는 시간을 결정합니다. 계측기의 애퍼처 시간을 변경함으로써, 유연하게 고정밀 측정을 위해 수집 윈도우를 확장하거나 고속 수집을 위해 수집 윈도우를 줄일 수 있습니다. 측정 애퍼처를 확장하면 계측기가 샘플링하고 평균하는 데 더 많은 시간을 할애할 수 있어 측정 노이즈가 줄어듭니다.

SMU 스펙은 애퍼처 시간이 측정 노이즈에 미치는 영향에 대한 정량적 데이터를 제공합니다. 참고로 그림 5는 PXIe-4139 SMU의 애퍼처 시간 대 측정 노이즈 그래프를 보여줍니다. 보시다시피, 애퍼처 시간을 증가시키면 노이즈 레벨이 크게 감소합니다. 또한 노이즈 레벨은 높은 전압 범위에서 더 높습니다. 사용 분야에 저전압 또는 저전류 측정이 필요한 경우, 계측기가 가능한 최저 측정 범위를 사용하도록 설정해야 합니다.

그림 6은 세 가지 다른 애퍼처 셋팅에서 60 V 범위를 사용하는 PXIe-4139 SMU의 실제 노이즈 성능을 보여줍니다. 그래프의 첫 번째 구간에서 애퍼처 시간은 100 μ s로 설정되었습니다. 보시다시피, 애퍼처 시간이 짧을 때 노이즈가 큼니다. 두 번째 구간에서는 애퍼처 시간을 1 ms로 설정하여 판독값의 노이즈를 크게 줄였습니다. 마지막 구간에서 애퍼처 시간은 16.7 ms로 설정되었으며, 이는 하나의 전원 라인 사이클입니다. 이 셋팅에서 노이즈는 미미하고 거의 눈에 띄지 않습니다.

일반적인 모범 사례는 애퍼처 시간을 전원 라인 사이클의 정수배로 설정하는 것입니다. 그리드 전력 주파수가 60 Hz인 국가에서는 하나의 전원 라인 사이클이 16.67 ms이지만, 50 Hz 그리드를 사용하는 국가에서는 하나의 전원 라인 사이클이 20 ms입니다. 여러 전원 라인 사이클에 걸쳐 샘플링하는 경우, DC 측정을 통해 60 Hz 또는 50 Hz 노이즈를 평균값으로 구합니다.



그림 4
샘플 신호에 대한 SMU의 애퍼처 시간에 대한 예시

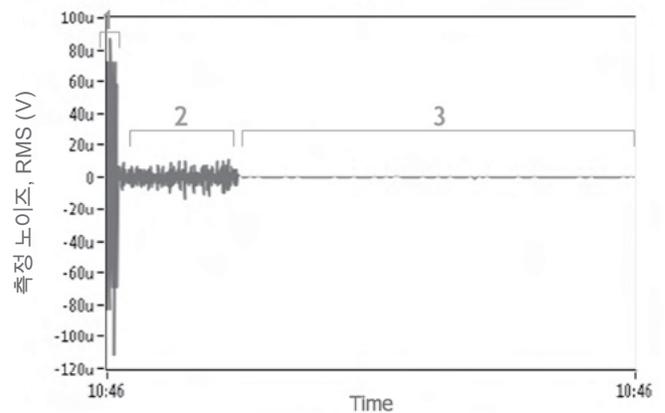


그림 5
전압 측정 노이즈 대 측정 애퍼처

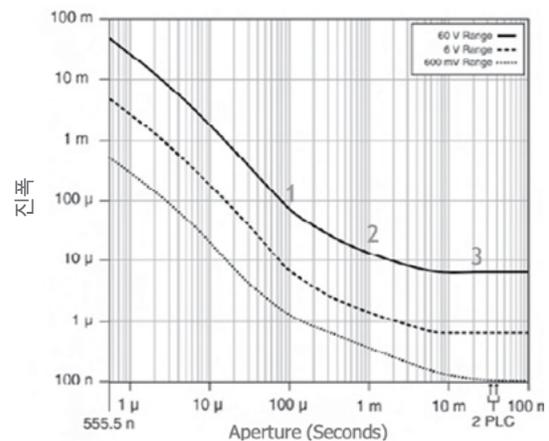


그림 6
시간

많은 사용 분야에서 테스트 시간의 최적화, 다시 말해, 애퍼처 시간의 최소화가 필요합니다. 그러나 짧은 애퍼처 시간은 추가적인 측정 노이즈를 발생시켜서 판독값의 정확도를 제한할 수 있습니다. 반대로, 부하의 과도 응답을 검사하려는 경우, 정확도가 주요 관심사가 아니라면 짧은 애퍼처 시간을 사용하여 SMU로 신호를 디지털화할 수 있습니다. 예를 들어, PXIe-4139 SMU는 최대 1.8 MS/s까지 샘플링할 수 있습니다. 이를 통해 신호의 상세한 과도 특성을 관찰할 수 있습니다. 새로운 사용 분야를 개발할 때는 속도와 정확도 사이의 균형을 염두에 두어야 합니다.

펄싱

많은 SMU의 또 다른 유용한 기능은 펄싱입니다. 펄싱을 사용하면 계측기가 짧은 시간 동안 제공할 수 있는 최대 전력 레벨을 초과할 수 있습니다. 이 때문에 펄스 모드 및 DC 모드를 사용할 때 SMU의 IV 경계가 달라집니다(그림 7의 더 자세한 IV 경계 그래프 참조).



그림 7
펄싱이 있는 경우의 샘플 SMU IV 경계

이러한 SMU는 전원 공급 장치에서 도출하는 것보다 더 많은 전력을 일시적으로 출력하기 때문에, 해당 전력에서 출력할 수 있는 속도와 기간에 제한이 있습니다. 주요 펄싱 스펙에 대한 제한을 통해, SMU는 너무 많은 전력의 싱킹으로 인한 과열 없이 원하는 전력을 일관되게 출력할 수 있습니다. 이러한 스펙에는 주기 점유율, 최대 전력, 최대 펄스 ON 시간, 최소 펄스 ON 시간, 및 최소 펄스 사이클이 포함됩니다.

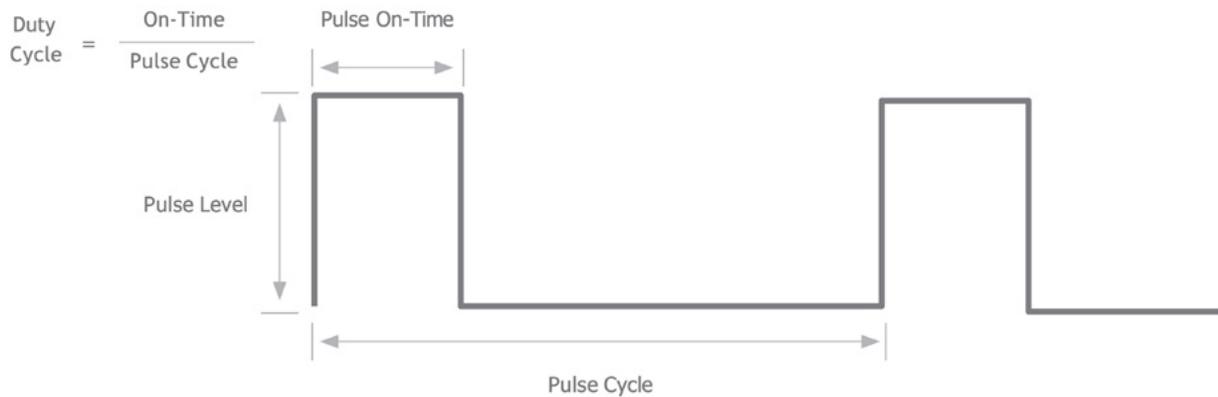


그림 8
주요 SMU 펄싱 스펙

펄스는 고전력 테스트 중에 DUT가 발산해야 하는 열을 제한하는 데 일반적으로 사용됩니다. 일정한 고전력 DC 신호가 DUT에 제공되는 경우, DUT의 온도가 상승하고 이러한 온도 변화로 인해 DUT의 전기적 및 물리적 속성이 변할 수 있습니다. 온도 변화가 아주 급격하면, 측정에 영향을 미치거나 심지어 DUT가 손상될 수도 있습니다. 그러나 전력을 펄싱함으로써, DUT를 통한 평균 전력 소모를 줄이고 자체 발열의 영향을 최소화할 수 있습니다.

펄스 모드를 사용할 때 고려해야 할 또 다른 사항은 SMU의 과도 응답입니다. 펄스 모드에서 테스트하는 경우, 펄스 폭은 계측기가 안정된 측정값을 얻을 수 있을 만큼 충분히 길어야 하지만, DUT의 자체 발열을 최소화할 수 있을 만큼 충분히 짧아야 합니다. 이를 위해서는 과도 응답을 임계 감쇠 상태로 만들어야 합니다. 그림 9와 같이 응답이 과소 감쇠 상태인 경우, 출력이 오버슈트되거나 불안정해져서 제대로 된 측정값을 제공하지 못하고 심지어 DUT가 손상될 수도 있습니다. 그림 10과 같이 응답이 과도 감쇠 상태인 경우, 펄스는 원하는 출력 레벨에 충분히 빨리 도달하지 못합니다. 그림 11과 같이 응답이 임계 감쇠 상태인 경우, 신호는 빠르게 안정되고 펄스를 측정할 시간이 생깁니다. SMU가 깨끗한 펄스를 생성하도록 하려면, 충분히 빠르게 샘플링할 수 있는 계측기로 과도 응답을 디지털화해야 합니다. PXIe-4139와 같은 일부 SMU에는 이 기능이 있지만, 이 기능이 없는 SMU의 경우에는 오실로스코프를 사용해야 합니다.

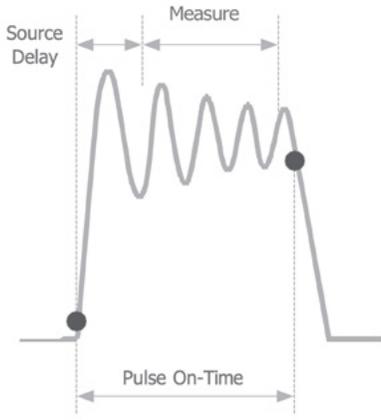


그림 9
과소 감쇠 상태의 과도 응답

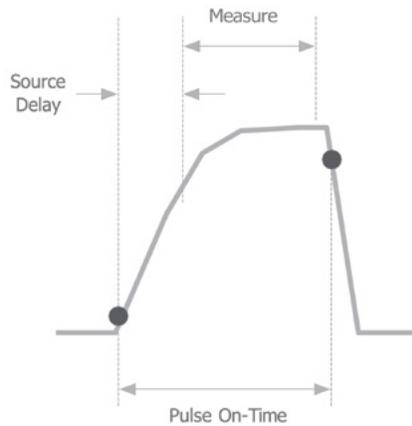


그림 10
과도 감쇠 상태의 과도 응답

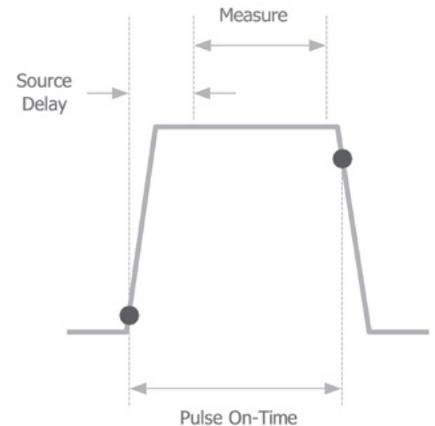


그림 11
임계 감쇠 상태의 과도 응답

DC 측정의 모범 사례

SMU 계측기 자체 외에 테스트 셋업도 측정에 영향을 미치는 핵심 요소입니다. 계측이 아무리 정확해도 열악한 신호 품질을 보완할 수 없습니다. 높은 정확도의 DC 측정을 하려면 높은 충실도의 신호가 필요합니다. 관심 대상 신호에 노이즈가 많은 경우, 고품질 계측기를 사용하더라도 정확한 측정값을 얻을 수 없습니다. 노이즈 및 에러의 많은 다양한 원인이 신호에 영향을 미칠 수 있지만, 이 백서에는 이러한 문제를 해결하는 데 도움이 되는 다양한 방법이 포함되어 있습니다. 측정의 타입이 다르면 다른 타입의 에러에 영향을 받기 때문에, 각 방법을 언제 어떻게 적용해야 하는지도 알아야 합니다. 이 섹션에서 논의하는 방법은 SMU뿐만 아니라 모든 타입의 계측기에서 수행되는 DC 측정에 적용됩니다. 그러나 이 가이드는 SMU에 초점을 맞추고 있기 때문에, 사용된 많은 예제는 이러한 계측기(SMU)를 특징으로 포함합니다. 이 섹션의 모범 사례와 이전 섹션의 계측기 정보를 결합하면 높은 정확도의 DC 측정 방법을 전체적으로 이해할 수 있습니다.

도선 저항의 영향을 상쇄하기 위한 원격 감지의 사용

원격 감지는 측정값에서 도선 저항의 영향을 제거하는 데 사용되는 방법입니다. 표준 2 와이어 셋업에서 전원 공급 장치를 5 V로 설정하면, 도선 저항으로 인해 전압 포텐셜이 떨어지기 때문에 DUT의 전압은 5 V보다 약간 낮아집니다. 예를 들어, 3 m 길이의 24 AWG 구리 와이어의 저항은 약 0.25 Ω 입니다. SMU에서 5 V와 1 A를 소싱하는 경우, 전압 포텐셜은 해당 와이어의 길이 전체에 걸쳐 0.25 V 만큼 떨어집니다. 원격 감지는 이러한 효과를 제거하여 DUT에 정확히 5 V가 인가되도록 합니다.

원격 감지는 고임피던스의 감지 라인 세트를 포함하는 4 와이어 셋업을 사용합니다. 원격 감지 중에 한 도선 세트는 출력 전류를 전달하는 반면, 다른 도선 세트는 DUT 터미널에서 전압을 직접 측정합니다. 그림 12에서 Output HI 및 Output LO 라인은 출력 전류를 전달하고, Sense HI 및 Sense LO 라인은 DUT 터미널에서 전압을 직접 측정합니다. 출력 도선을 통해 흐르는 많은 양의 전류는 해당 도선을 통한 더 큰 전압 강하를 초래하지만, 고임피던스 감지 라인에는 무시할 만한 양의 전류가 통과하기 때문에 도선 저항으로 인한 전압 강하를 무시할 수 있습니다. 감지 라인과 SMU를 사용하면, 도선 저항으로 인한 전압 강하를 보정하기 위해 출력 전압을 증가시킴으로써 감지 도선에서 원하는 출력 전압을 유지할 수 있습니다. 이는 실제로 정의한 전압에 더 가까운 전압을 DUT에 공급한다는 것을 의미합니다.

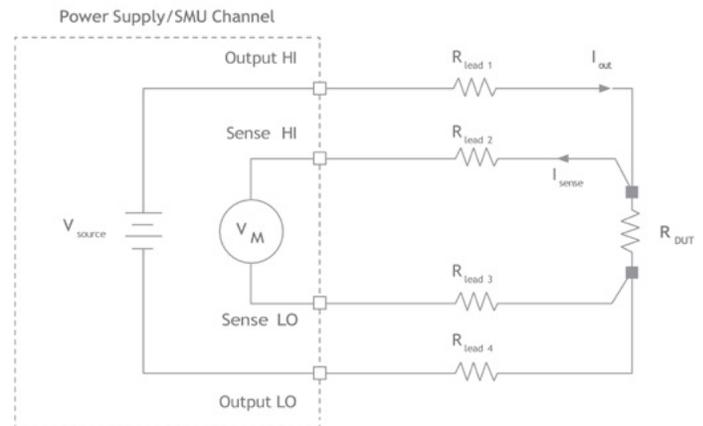


그림 12
4 와이어 원격 감지 측정 셋업

원격 감지 기능이 있는 디바이스에는, 원격 감지를 사용할 때 정확도를 계산하는 방법에 대한 추가 스펙이 있습니다. 이 정확도의 계산 방법을 더 잘 이해하기 위해, PXIe-4139 SMU의 스펙을 사용하는 예제를 살펴보겠습니다. 이 예제에서는 SMU의 600 mV 범위를 사용하는 500 mV 출력의 원격 감지 정확도를 계산합니다. 표 1은 추가적인 셋업 프로퍼티를 보여줍니다.

600 mV 범위를 사용할 때 SMU의 정확도는 0.016 퍼센트 + 30 μ V입니다.

이 계측기의 원격 감지 전압 정확도 스펙은 다음과 같이 명시되어 있습니다.

“HI 도선 강하의 V당 (전압 범위의 3 ppm + 11 μ V) 및 전압 정확도 스펙에 해당하는 감지 도선 저항의 Ω 당 도선 강하의 V당 1 μ V를 추가하십시오.”

다음 수식을 사용하여 원격 감지 정확도를 계산할 수 있습니다.

$$\begin{aligned} \text{정확도} &= (\text{SMU 정확도, 범위}=600 \text{ mV}) + \text{도선 전압 강하로 인한 에러} + \\ &\quad \text{도선 저항별 도선 전압 강하로 인한 에러} \\ \text{정확도} &= (500 \text{ mV} * 0.016\% + 30 \mu\text{V}) + \frac{600 \text{ mV} * 3 \text{ ppm} + 11 \mu\text{V}}{\text{도선 강하의 } 1 \text{ V}} * 3 \text{ V} + \frac{1 \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 3 \text{ V} * 2 \Omega + \frac{1 \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 2.5 \text{ V} * 1.5 \Omega \\ \text{정확도} &= (80 \mu\text{V} + 30 \mu\text{V}) + 12.8 \mu\text{V} * 3 + 6 \mu\text{V} + 3.8 \mu\text{V} \\ \text{정확도} &= 158.2 \mu\text{V} \end{aligned}$$

이는 실제 출력이 500 mV의 158.2 μ V 내에 있음을 의미합니다. 위 계산에서 괄호 안의 부분은 600 mV 범위를 사용할 때 SMU의 정확도를 나타냅니다. 위 수식의 나머지 부분은 원격 감지 전압 정확도 스펙을 나타냅니다.

원격 감지를 사용하는 경우, 감지 라인은 DUT에 최대한 가깝게 연결해야 합니다. 이렇게 하면 감지 라인이 DUT의 전압을 정확하게 판독할 수 있습니다. 그러나 때로는 감지 라인을 DUT에 직접 연결할 수 없는 경우가 있습니다. 예를 들어, DUT가 직접 프로브할 수 없는 보드 영역에 있는 경우가 그렇습니다. 이 경우, 원격 감지 연결부에서 제공되는 전압은 정확하지만, 원격 감지가 연결된 곳과 실제 DUT 사이에 추가적인 저항으로 인해 전압 강하가 발생합니다. DUT에 정확한 전압 레벨이 인가되도록 하려면, 일부 SMU를 사용하여 음의 출력 저항을 설정할 수 있습니다. 원하지 않는 이러한 전압 강하를 무효화하려면, 원격 감지 연결부와 DUT 사이의 경로 저항과 같은 음의 출력 저항을 프로그래밍할 수 있습니다. 이렇게 하면, 원격 감지 라인을 DUT에 직접 연결할 수 없는 경우에도 계측기가 DUT에 정확한 전압을 제공할 수 있습니다.

HI 경로 도선 강하	3 V
HI 감지 도선 저항	2 Ω
LO 경로 도선 강하	2.5 V
LO 감지 도선 저항	1.5 Ω

표 1
원격 감지 측정 셋업의 프로퍼티

원격 감지는 특히 낮은 저항 측정에 유용합니다. SMU와 디지털 멀티미터(DMM)를 모두 사용하면, 저항을 계산하기 위해 전류를 소싱하고 전압을 측정함으로써 저항을 측정할 수 있습니다. 100 kΩ미만의 정밀 저항을 측정하는 경우, 도선 저항의 영향을 최소화하려면 2 와이어 셋업 대신 4 와이어 원격 감지 셋업을 사용해야 합니다. 앞에서 2 와이어 방법을 사용할 때 도선 저항이 전압 측정에 미치는 영향에 대해 알아보았습니다. 전압 측정값에서 저항 측정값을 계산하기 때문에, 전압 판독값이 부정확하면 저항 판독값도 부정확하게 됩니다. 4 와이어 방법을 사용하면 도선 저항의 영향을 제거해서 더 정확한 측정값을 생성할 수 있습니다.

표 2는 원격 감지가 측정에 가져올 수 있는 차이를 보여 줍니다. 이 데이터는 스위치를 통해 저항을 측정하는 DMM으로 생성됩니다. 스위치의 도선 저항이 측정값에 0.522 Ω을 추가했으며, 이는 5.24 퍼센트의 에러를 나타냅니다. 원격 감지를 사용하면 도선 저항의 에러를 제거하고 더 정확한 판독값을 얻을 수 있습니다.

원격 감지를 사용할 때는 계측기의 한계를 염두에 두어야 합니다. SMU와 DMM에는 관리할 수 있는 최대 전압 강하 레벨이 있습니다. 예를 들어, PXIe-4139는 도선당 최대 3 V의 도선 강하를 보정할 수 있습니다. 이는 디바이스가 HI 측에서 3 V 강하를 보정하고 LO 측에서 또 다른 3 V 강하를 보정할 수 있음을 의미합니다. 일단 이 한계에 도달하면 계측기는 더 이상 도선 저항을 완전히 보정할 수 없습니다. 보정되지 않은 도선 저항은 측정의 정확도를 떨어뜨립니다.

원격 감지를 사용한 도선 저항의 보정

실제 저항	원격 감지를 사용하지 않은 측정값	원격 감지를 사용한 측정값
9.958 Ω	10.48 Ω	9.958 Ω

표 2
원격 감지가 측정에 가져올 수 있는 차이

오프셋 전압의 보정

저전압 측정의 경우, 오프셋 전압의 영향을 제거해야 합니다. 오프셋 전압의 일반적인 원인 중 하나는 열 EMF입니다. 서로 다른 금속으로 구성된 도선 사이에 열전쌍이 형성되기 때문에, 열 EMF에서는 여러 전압이 회로에 유입됩니다. 예를 들어, 측정을 위해 스위치를 SMU와 쌍으로 연결하는 셋업이 있는 경우, 스위치는 신호 경로에 존재하는 서로 다른 접점으로 인해 열 EMF 에러의 원인이 됩니다. 스위치 스펙에는 열 EMF가 포함되는 경우가 많습니다. NI PXI-2530 행렬 스위치는 리드 릴레이를 사용하며 열 EMF가 50 μV 미만입니다. 측정값이 밀리볼트 이하인 경우, 해당 스위치의 열 EMF로 인해 상당한 에러가 발생합니다.

오프셋 보정은 열 EMF의 영향을 상쇄하는 데 사용할 수 있는 한 방법입니다. SMU로 오프셋 보정을 구현하려면 디바이스가 두 번의 측정을 수행하도록 프로그래밍해야 합니다. 그림 13은 이러한 측정을 보여 줍니다.

첫 번째 측정 사이클에서는 SMU 전류 소스가 켜져 있고 전압 측정에 열 EMF가 포함됩니다. 두 번째 측정 사이클에서는 SMU 전류 소스는 꺼져 있으며, 이는 열 EMF에 의해 유도된 전압만 측정한다는 것을 의미합니다. 이제 첫 번째 측정값에서 두 번째 측정값을 빼면, 열 EMF의 영향을 포함하지 않는 정확한 측정값을 얻을 수 있습니다. 다음 수식은 계산 방법을 보여 줍니다. 이 수식에서 V_{OC} 는 오프셋 보정이 적용된 후의 전압을 나타냅니다. V_{M1} 은 전류 소스가 켜진 상태에서 측정된 전압이며, V_{M2} 는 전류 소스가 꺼진 상태에서 측정된 전압입니다. I_S 는 SMU 전류 소스의 전류를 나타내며, R_X 는 부하의 저항을 나타냅니다. 마지막으로, $V_{thermal}$ 은 열 EMF로 인한 오프셋 전압입니다.

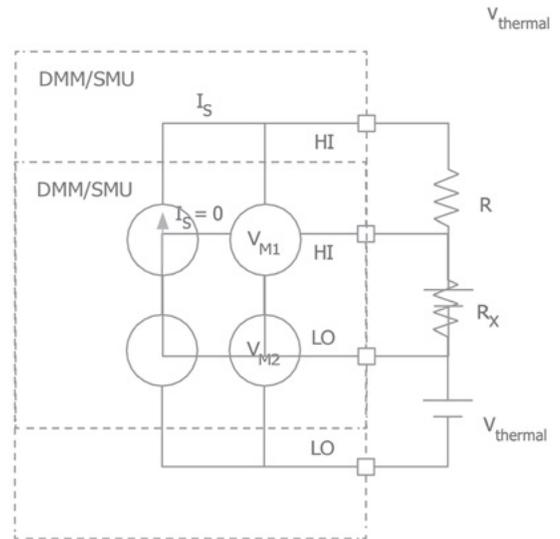


그림 13
오프셋 보정 측정 사이클

$$V_{OC} = V_{M1} - V_{M2} = (I_S R_X + V_{thermal}) - V_{thermal} = I_S R_X$$

두 측정값은 모두 열 EMF 오프셋 전압인 $V_{thermal}$ 을 포함합니다. 해당 오프셋 전압이 두 측정값 모두에 존재하기 때문에, 첫 번째 측정값에서 두 번째 측정값을 빼면 이 오프셋이 제거됩니다.

오프셋 전압을 제거하는 또 다른 방법은 전류 반전 방법입니다. 오프셋 보정 방법과 마찬가지로, 전류 반전 방법에도 두 번의 측정이 필요합니다. 첫 번째 측정은 양극 전류로, 두 번째 측정은 음극 전류로 수행합니다. 다음 수식은 이러한 측정값에 대한 수학적 표현입니다.

$$\begin{aligned} V_{M1} &= I_S R_X + V_{thermal} \\ V_{M2} &= -I_S R_X + V_{thermal} \end{aligned}$$

다시 말하면, 두 측정값이 모두 V_{thermal} 을 포함하기 때문에, 아래에 보이는 것처럼 두 측정값을 결합함으로써 이 오프셋을 제거할 수 있습니다.

$$V_{\text{CR}} = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} = \frac{(I_S R_x + V_{\text{thermal}}) - (-I_S R_x + V_{\text{thermal}})}{2} = I_S R_x$$

전류 반전 방법의 한 장점은 오프셋 보정 방법보다 더 높은 정확도의 측정값을 제공한다는 것입니다. 이는 두 측정값을 평균하여 최종 측정값을 생성하기 때문입니다. 이 방법의 단점은 양극 및 음극 전류를 소싱할 수 있는 디바이스가 있어야 한다는 점입니다. 반면에, 오프셋 보정 방법은 양극 전류만 필요합니다.

외부 노이즈의 최소화

민감한 측정을 수행할 때는 노이즈가 판독값에 미치는 영향을 고려해야 합니다. 노이즈는 전자기 간섭 또는 기생 용량과 같은 여러 원인에서 발생할 수 있습니다. 전자파 간섭은 스펙트럼 전반에 걸쳐 광범위한 주파수에서 기인하는 간섭을 포함합니다. TV, AM/FM 라디오, 및 전원 라인은 모두 전자파 간섭의 원인이 될 수 있습니다. 기생 용량은 전기적으로 대전된 물체가 측정 회로에 가까이 있을 때 발생합니다. 전압이 다른 두 개의 전기 도체가 서로 가까이 있을 때, 해당 도체들 사이의 전기장은 해당 도체들에 전하를 저장하게 됩니다. 이는 진동하듯 변하는 노이즈 또는 측정 오프셋 값으로 나타날 수 있습니다. 차폐를 사용하면 전기장의 영향을 줄이고 측정값의 에러를 최소화할 수 있습니다.

차폐는 전도성 물질로 구성된 장벽으로 공간의 전자기장을 차단해서 이를 줄이는 방법입니다. 실제로는 전체 측정 회로에 차폐를 적용해야 하므로, DUT 및 DUT와의 연결에 사용되는 케이블을 모두 차폐해야 합니다. 패러데이 케이지와 차폐 케이블이 널리 사용되며, 도선과 함께 DUT 주변 영역을 차폐하는 데 사용될 수 있습니다. 동축 케이블은 일반적인 타입의 차폐 케이블입니다. 동축 케이블의 코어는 쉴드가 에워싸는 절연층으로 둘러싸여 있습니다. 외부 쉴드는 내부 코어를 전기적 노이즈로부터 보호합니다(그림 14 참조). 보시다시피, 쉴드는 계측기의 LO 터미널에 연결되어 있습니다. 이런 연결 때문에, 쉴드가 포착한 모든 전자기 간섭 또는 기생 용량은 계측기의 HI 터미널이 아닌 접지로 흐릅니다. 동축 케이블에 보호층을 추가하여 HI 및 LO 터미널 사이의 기생 용량을 해결할 수 있습니다 ([누출 전류에 대한 보호](#) 섹션 참조). 계측기의 LO 터미널이 지면 위에 떠 있는 경우, 테스트 셋업 주위에 다른 케이지를 추가하여 작업자가 실수로 쉴드를 건드리지 않도록 해야 합니다.

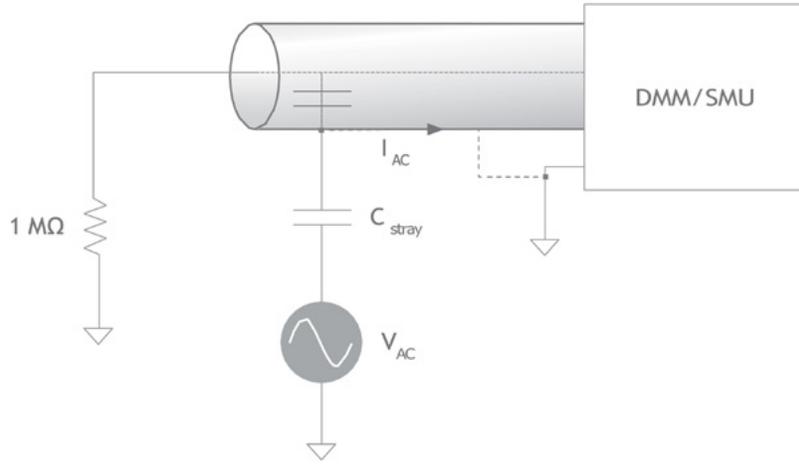


그림 14

차폐가 전도성 물질로 구성된 장벽으로 공간의 전자기장을 차단하여 이를 감소시키는 방법을 보여 주는 회로 다이어그램.

차폐는 특히 고임피던스 측정에 유용합니다. 그림 14에서 I_{AC} 는 노이즈 소스인 V_{AC} 에 의해 유도된 전류임을 확인할 수 있습니다. 차폐를 사용하지 않는 경우, 유도 전류가 측정 회로에 나타납니다. 고저항 측정을 수행하는 경우, 유도 전류의 영향이 커집니다. 옴의 법칙에 따르면, 저항이 크면 I_{AC} 는 측정값에서 더 큰 전압 에러를 발생시킵니다. 그러므로 고저항 DUT로 작업할 때는 차폐가 중요합니다.

차폐 케이블을 사용하여 DUT를 계측기에 연결하는 경우, 쉴드를 계측기 접지와 DUT 접지 중 하나에만 연결해야 하며 이 두 가지 접지에 동시에 연결해서는 안 됩니다. 이는 측정 셋업에서 접지 루프가 생성되는 것을 방지하기 위한 것입니다. 접지 루프는 시스템에 두 개의 접지 참조 포인트가 있지만 각 포인트의 전압 포텐셜이 서로 다를 때 발생합니다. 이로 인해 두 접지 참조 사이에 전류가 흐르게 되고, 이는 측정에 영향을 미칩니다. DUT가 접지되고 케이블의 쉴드가 DUT 접지와 계측기 접지에 모두 연결된 경우, 접지 루프가 형성될 수 있습니다. 쉴드를 한쪽 끝에만 연결하면 이러한 잠재적인 문제를 제거할 수 있습니다.

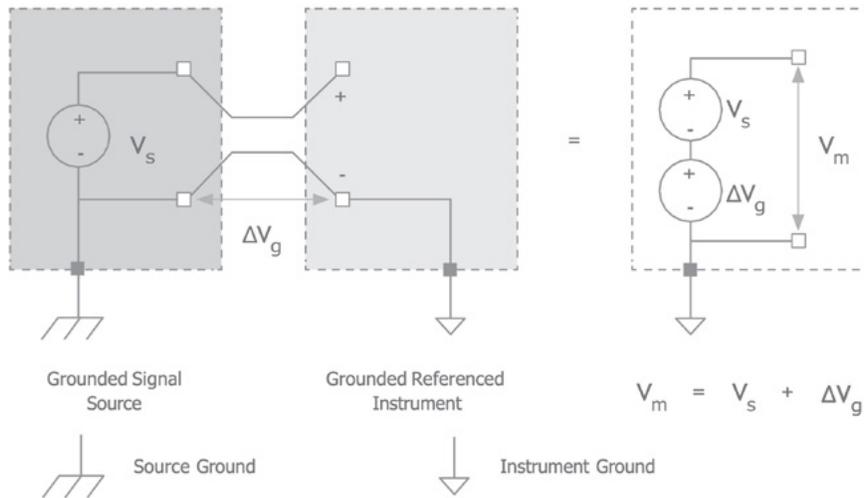


그림 15

접지 참조 시스템으로 측정된 접지된 신호 소스는 접지 루프와 측정 에러를 발생시킵니다.

외부 노이즈의 또 다른 원인은 자기장입니다. 자기장이 회로에서 유도하는 전압의 크기는 회로가 둘러싸는 면적에 비례합니다. 측정 도선이 회로에서 큰 루프를 생성하는 경우, 해당 셋업은 자기 유도 노이즈에 더 민감합니다. 간단하고 널리 사용되는 해결 방법은 연선 (twisted pair) 케이블을 대신 사용하는 것입니다. 연선 케이블을 사용하면 도선이 함께 꼬여 회로가 둘러싸는 면적이 줄어들고 셋업이 자기 노이즈에 덜 민감하게 됩니다. 연선 케이블 주위에 차폐를 추가하여 외부 전자기 노이즈로부터 도선을 보호할 수 있습니다.

누출 전류에 대한 보호

실드를 사용하면 외부 전자파 간섭이 측정에 영향을 미치는 것을 방지할 수 있지만, 가드를 사용하면 실드와 측정 회로 사이의 누출 전류 및 기생 용량에 대한 보호를 제공합니다. 동축 케이블과 같이 가드가 없는 케이블을 사용하는 경우, 케이블 절연체가 부하와 평행하게 되어 HI 및 LO 터미널 사이에 누출 전류가 흐릅니다. 그림 16에서 I_L 은 HI 및 LO 터미널 사이에 흐르는 누출 전류를 나타냅니다. 이는 SMU 디바이스가 측정하는 전류가 부하 전류 I_{Load} 및 누출 전류 I_L 의 합임을 의미합니다.

가드를 통한 보호는 저전류 및 초저전류 측정을 수행할 때 특히 중요합니다. 이를 설명하기 위해, 동축 케이블을 사용하여 50 V를 소싱할 때 누출 전류가 측정에 얼마나 영향을 미칠 수 있는지 계산해 보겠습니다. 동축 케이블에서는 절연층이 내부 코어와 외부 실드를 분리합니다. 이상적으로는 절연체의 저항이 무한대이지만, 실제로는 유한합니다. 절연 저항은 모든 동축 케이블마다 다르지만, 주어진 케이블의 저항을 100 GΩ이라고 가정하겠습니다. 절연체를 통과하는 누출 전류는 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$I_L = \frac{50 \text{ V}}{100 \text{ G}\Omega} = 0.5 \text{ nA}$$

이 계산에 따르면, 사용 분야가 펨토암페어 수준의 측정을 요구하는 경우, 동축 케이블을 사용할 수 없습니다. 또한 전압 레벨이 증가함에 따라 누출 전류의 양도 증가합니다.

이렇게 하위 레벨의 전류를 측정하려면, 3축 케이블을 대신 사용해야 합니다. 그림 18은 3축 케이블의 다이어그램을 보여 줍니다. 3축 케이블에는 케이블 코어와 실드 사이에 가드라고 하는 전도성 피복층이 추가로 있습니다.

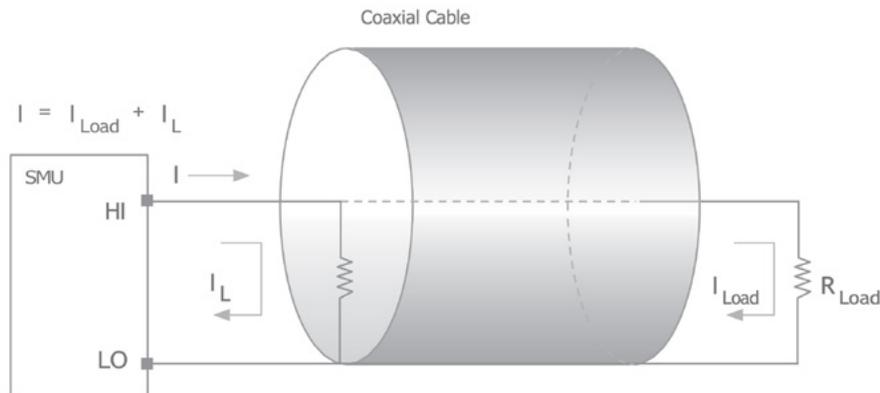


그림 16
동축 케이블의 누출 전류

이 중간층은 SMU의 가드 터미널에 연결됩니다. SMU의 가드 터미널은 HI 터미널의 전압을 따르는 유니티 게인 버퍼(unity gain buffer)에 의해 구동됩니다. 유니티 게인 버퍼는 음의 피드백 연산 증폭기(그림 17 참조)이며, 이 경우 연산 증폭기의 출력인 V_{out} 은 해당 증폭기의 음극 입력 터미널에 연결됩니다. 연산 증폭기의 양극 입력 터미널인 V_{in} 을 SMU의 HI 터미널에 연결하면, 연산 증폭기의 출력 전압은 SMU의 HI 터미널의 전압과 일치합니다.

3축 케이블의 보호층이 이 유니티 게인 버퍼에 연결되어 있기 때문에, 보호층은 HI 터미널과 같은 전압 포텐셜을 가지며, HI 터미널과 가드 터미널 사이에는 사실상 0V의 전압 강하가 발생합니다(그림 18 참조).

전압 포텐셜에 차이가 없기 때문에, HI 터미널과 가드 사이에 누출 전류가 흐르지 않습니다. 일부 누출 전류 I_{Guard} 는 여전히 가드 출력에서 LO 터미널로 흐르지만, 이런 전류는 HI 터미널이 아닌 유니티 게인 버퍼에 의해 공급되기 때문에 이 누출은 출력이나 측정에 영향을 미치지 않습니다. 결과적으로 3축 케이블은 누출 전류의 영향을 제거하고 더 정확한 전류 측정값을 제공합니다.

또한 가드를 사용하면 SMU의 HI 및 LO 터미널 사이의 기생 용량을 줄일 수 있습니다. 전압 포텐셜이 다른 두 개의 전기 도체가 서로 가까이 있을 때, 해당 도체들 사이의 전기장은 해당 도체들에 전하를 저장하게 됩니다. 이런 효과가 기생 용량입니다. 동축 케이블의 경우, 내부 코어(HI)가 외부 쉴드(LO)에 가깝기 때문에 기생 용량이 발생합니다. HI 및 LO 터미널 사이의 전압 포텐셜의 차이가 크기 때문에, 기생 용량이 충전되는 데 더 긴 시간이 걸리며, 이는 신호가 안정되는 데 더 오랜 시간이 걸린다는 것을 의미합니다. 가드를 사용하는 경우, HI 터미널과 가드 터미널의 전압 포텐셜이 동일하기 때문에 해당 터미널 사이의 기생 용량은 대규모로 충전될 필요가 없습니다. 이렇게 하면 신호가 안정되는 데 걸리는 시간이 줄어듭니다.

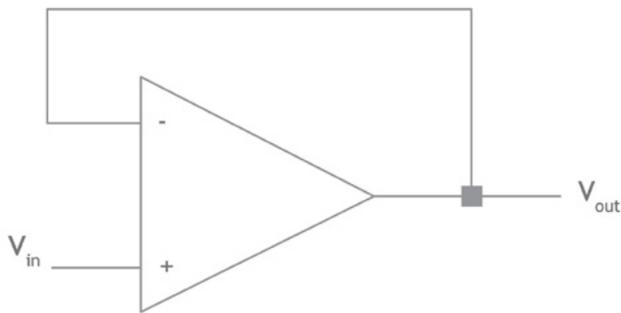


그림 17
유니티 게인 버퍼

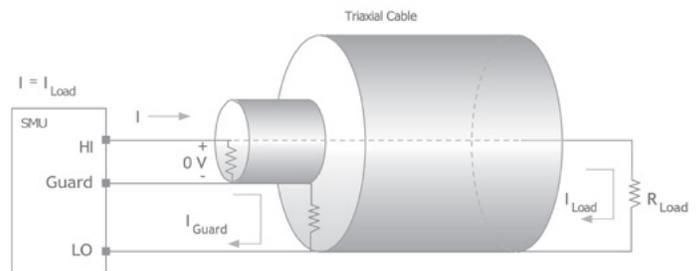


그림 18
가드 사용의 효과

가드를 사용해야 하는 일반적인 사용 분야 중 하나는 입력 누출 테스트입니다. 칩의 고임피던스 입력 핀으로 흘러 들어가는 전류의 양을 측정함으로써 입력 누출 테스트를 수행합니다. 이상적인 입력 핀은 임피던스가 무한대이므로 전류가 흐르지 않습니다. 그러나 실제 DUT의 임피던스는 크기는 하지만 유한하므로, 일반적으로 마이크로암페어 수준 이하의 작은 전류의 흐름이 발생합니다. 이 테스트는 일반적으로 SMU를 사용하여 수행되는데, 그 이유는 전압의 소싱과 전류의 측정을 동시에 할 수 있기 때문입니다.

이는 하위 레벨의 전류를 측정하는 것이므로, 가능한 가장 정확한 측정을 보장하기 위해 SMU의 가드 라인을 사용해야 합니다. 일단 DUT를 SMU에 연결한 후에는 SMU가 전압을 소싱하도록 설정해야 합니다. 또한 전류 리미트를 설정하여 DUT가 손상되지 않도록 보호해야 합니다. SMU는 전압을 소싱하면서 DUT에서 누출되는 전류를 측정합니다. 그런 다음 누출 전류 값을 해당 DUT의 허용 리미트와 비교하여 DUT가 스펙 내에 있는지 확인할 수 있습니다. 이때 SMU의 HI 및 LO 터미널 사이에서 누출되는 전류까지 측정하지 않도록 주의합니다. 이 사용 분야에서 동축 케이블을 사용하는 경우, 동축 케이블의 누출 전류가 측정값에 추가되어서 DUT의 실제 누출 전류가 스펙 범위 내에 있더라도 DUT가 해당 테스트에 실패할 수 있습니다. 3축 케이블과 SMU의 가드 터미널을 사용함으로써 더 정확한 전류 측정값을 얻을 수 있으며, 의도치 않게 DUT가 해당 테스트에 실패하는 것을 방지할 수 있습니다.

교정의 중요성 이해

계측기가 스펙에 명시된 수준으로 작동하도록 보장하려면 교정이 필요합니다. 교정의 두 가지 주요 형태는 외부 교정과 자기 교정입니다. 외부 교정을 사용하여 계측기의 편차를 보정하고, 자기 교정을 사용하여 온도로 인한 에러를 보정할 수 있습니다.

더 복잡한 절차인 외부 교정에는 매우 정밀한 전압 소스가 필요합니다. 외부 교정이 수행되면 계측기의 내장 EEPROM 교정 상수가 조정되고 겹쳐 써집니다. 디바이스 드라이버는 이 상수를 사용하여 주어진 측정값에 적절한 값을 반환합니다. 외부 교정은 자기 교정이 접근할 수 없는 내장 참조 또는 오프셋의 장기적인 편차를 보정하는 데 주로 사용됩니다. 계측기의 공개된 스펙을 유지하려면, 계측기에 따라 1년에서 2년마다 외부 교정을 수행할 것을 권장합니다.

자기 교정은 추가적인 장비 없이 수행할 수 있는 훨씬 더 간단한 과정입니다. 이 과정에서는 알려진 내부 참조를 보드의 모든 채널에 연결합니다. 그런 다음, 다양한 게인 셋팅에서 참조 전압을 판독해서 예상값과 비교합니다. 이런 온도 보호 참조 전압은 온도 변화로 인한 에러를 보정하기 위한 것입니다. 부품의 속성은 작동 온도에 따라 달라지므로, 자기 교정을 사용하여 온도 변화를 보정하고 계측기의 정확도를 최대한으로 높여야 합니다.

그림 19, 20, 및 21의 그래프는 자기 교정이 가져올 수 있는 차이를 보여 줍니다. 이 그래프는 여러 디바이스를 온도 챔버에 넣고 그 성능을 모니터링하여 만들었습니다. 그림 19는 24시간 동안 보드의 온도가 어떻게 변했는지 보여 줍니다. 그림 20은 오프셋 전압 레벨이 같은 기간 동안 어떻게 변했는지 보여 줍니다. 온도가 높을수록 작은 양의 전압 오프셋이 발생했고, 온도가 낮을수록 음의 전압 오프셋이 발생했습니다. 그러나 각 측정을 수행하기 전에 자기 교정을 사용하면, 온도로 인한 전압 오프셋을 제거할 수 있으며 측정값이 영향을 받지 않습니다(그림 21 참조).

자기 교정은 내장 참조 전압의 정확도만큼만 정확하다는 것을 기억하십시오. 그러므로 제조업체가 권장하는 간격으로 계측기에 대해 외부 교정을 수행하여 참조 전압이 스펙 내에 있는지 확인해야 합니다.

결론

이 가이드에서 다룬 다양한 방법을 사용하면, DC 측정이 필요한 사용 분야에서 더 높은 정확도를 달성할 수 있습니다. 이러한 방법을 자신의 측정 셋업에 적용할 때, 각 방법이 어떤 종류의 에러를 해결하도록 고안되었는지 기억하십시오. 이렇게 하면 발생하는 측정 관련 문제에 올바른 해결책을 적용할 수 있습니다. 예를 들어, 하위 레벨의 전류 측정에서 상승 시간이 느린 경우, 3축 케이블로 전환하고 가드를 추가하면 도움이 될 수 있습니다. 전원 라인 노이즈가 발생하는 경우, 셋업에 차폐를 추가하고 애퍼처 시간을 하나의 전원 라인 사이클로 설정할 수 있습니다. 이러한 모범 사례를 숙지하면 테스트 장비를 최대한 활용할 수 있습니다.

NI SMU 및 해당 SMU의 사용자 정의 과도 응답이나 고급 시퀀싱 기능에 대한 더 자세한 정보는 ni.com/smu를 참조하십시오.

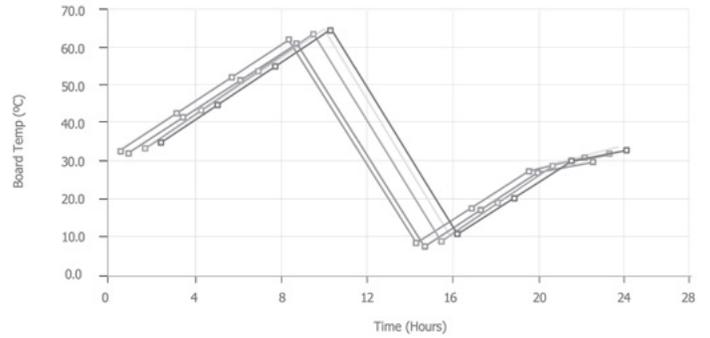


그림 19
24시간 동안 측정된 테스트 보드의 온도

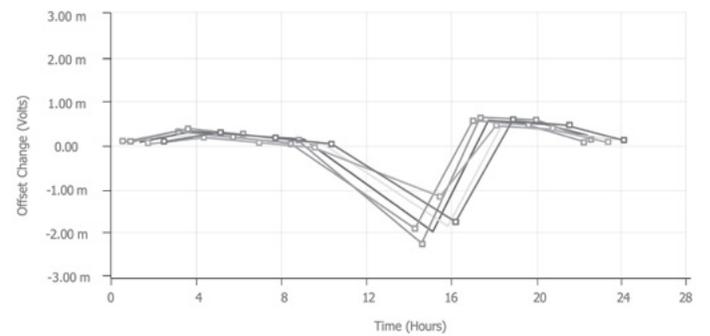


그림 20
자기 교정을 사용하지 않은 경우의 전압 편차

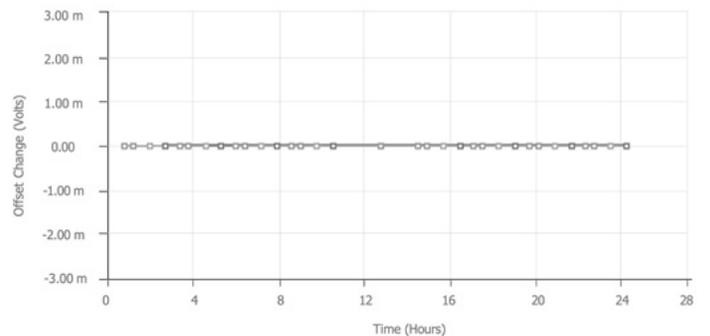


그림 21
자기 교정을 사용한 경우의 전압 편차

DC 측정 성능 극대화를 위한 실용 가이드

Emerson, Emerson Automation Solutions 또는 그 계열사는 제품의 선택, 사용 또는 유지보수에 대한 책임을 지지 않습니다. 제품의 적절한 선택, 사용 및 유지보수에 대한 책임은 전적으로 구매자와 최종 사용자에게 있습니다.

National Instruments, NI, 및 NI.com은 Emerson Electric Co.의 Test & Measurement 사업부 소속 회사 중 하나가 소유한 상표입니다. Emerson 및 Emerson 로고는 Emerson Electric Co.의 상표 및 서비스 상표입니다.

이 출판물의 내용은 정보 제공의 목적으로만 제공되며, 정확성을 보장하기 위한 모든 노력을 기울였으나 해당 내용은 여기서 설명된 제품이나 서비스 또는 해당 제품과 서비스의 사용이나 적용 가능성에 대한 명시적이거나 묵시적인 보증 또는 보장으로 해석되어서는 안 됩니다. 모든 판매에는 당사의 이용 약관이 적용되며, 요청 시 제공됩니다. 당사는 사전 통보 없이 언제든지 해당 제품의 설계 또는 사양을 수정하거나 개선할 권리가 있습니다.

NI
11500 N Mopac Expwy
Austin, TX 78759-3504



[Linkedin.com/company/niglobal/](https://www.linkedin.com/company/niglobal/)



[Twitter.com/NIglobal](https://twitter.com/NIglobal)



[Youtube.com/@NIGlobalYoutube](https://www.youtube.com/@NIGlobalYoutube)



[Instagram.com/niglobal/](https://www.instagram.com/niglobal/)



[Facebook.com/NationalInstruments](https://www.facebook.com/NationalInstruments)

