

# 저전압 측정 기법

## 애덤데이러, 키슬리 PM(제품 마케팅 담당)

### 개요

소비자들은 더 작은 폼 팩터에서 더 빠르고 기능이 풍부한 제품을 요구함에 따라 전자 제품은 계속 줄어들고 있습니다. 크기가 작기 때문에 이러한 전자 부품은 일반적으로 전력 처리 기능이 제한되어 있습니다. 결과적으로 이러한 구성 요소를 전기적으로 특성화 할 때 구성 요소 고장 또는 기타 손상을 방지하기 위해 테스트 신호를 작게 유지해야 합니다. 이러한 장치 및 재료를 테스트하는 작업에는 종종 저전압 측정이 포함됩니다. 여기에는 알려진 전류 소싱, 결과 전압 측정 및 저항 계산이 포함됩니다. 장치의 저항이 낮으면 결과 전압이 매우 작고 오프셋 전압과 노이즈를 줄이기 위해 세심한 주의를 기울여야 합니다. 높은 신호 레벨을 측정 할 때는 일반적으로 무시할 수 있습니다.

저항이 재료에서 멀어 지더라도 디바이스 손상을 피하기 위해 작은 전류 만 공급해야 하기 때문에 측정 할 전압이 매우 작은 경우가 많습니다. 이러한 전력 제한으로 인해 최신 장치 및 재료의 저항 특성을 파악하기가 어려운 경우가 많습니다.

이 논문에서는 저전력/저전압 애플리케이션을 위한 3 개 delta 측정 방법을 포함하여보다 정확한 저항 측정을 위해 열전 전압을 제거하는 기술에 대해 설명합니다. 또한 차동 컨덕턴스 측정을 정확하게 수행하는 방법도 제시합니다.

### 저수준 전압 측정

저전압 측정을 어렵게 만드는 많은 요소가 있습니다. 예를 들어, 다양한 노이즈 소스가 실제 전압을 해결하는 데 방해가 될 수 있으며 열전 전압 (열전 EMF)으로 인해 오류 오프셋과 전압 판독 값이 변동될 수 있습니다. 과거에는 DUT의 응답 전압이 이러한 오류보다 훨씬 클 때까지 단순히 테스트 전류를 증가시킬 수 있었지만 오늘날 더 작은 장치에서는 더 이상 옵션이 아닙니다. 테스트 전류가 증가하면 장치가 가열되거나 장치의 저항이 변경되거나 장치가 파손될 수 있습니다. 정확하고 일관된 측정을 얻는 열쇠는 오류를 제거하는 것입니다.

저전압 측정 어플리케이션의 경우, 이러한 오차는 크게 백색 잡음 (모든 주파수에서 임의의 잡음)과 1/f 잡음으로 구성됩니다. 회로의 온도차에서 열전 전압 (일반적으로 1/f 분포)이 발생합니다. 저항은 옴의 법칙을 사용하여 계산됩니다. 즉, 장치 전체에서 측정된 DC 전압을 DC 자극 전류로 나눈 값이 저항을 산출합니다.

전압 판독 값은 디바이스 (VR), 리드 및 접촉 저항 (Vlead res), 기타 1/f 노이즈 기여 (V1/f 노이즈) 및 화이트 노이즈 (Vwhite 노이즈)에 걸친 유도 전압의 합입니다.

전압계와 전류 소스를 장치에 연결하기 위해 4개의 개별 리드를 사용하면 전압계가 소스 리드의 전압 강하를 측정하지 않기 때문에 리드 저항이 제거됩니다.

필터링을 구현하면 백색 노이즈는 줄어들지만 1/f 노이즈는 크게 줄이지 않으므로 측정 노이즈 플로어가 설정되는 경우가 많습니다. 열전 전압은 일반적으로 1/f 특성을 갖습니다. 이는 상당한 오프셋이 있을 수 있으며 측정이 많을수록 드리프트가 더 많이 발생함을 의미합니다. 종합하면, 오프셋과 드리프트는 적용 전류에 의해 유도되는 DUT 양단의 전압인 VR을 초과 할 수도 있습니다. 모든 구리 회로 구성, 단열, 정밀한 온도 제어 및 빈번한 접촉 세척과 같은 기술을 사용하여 열전 전압을 줄일 수 있습니다. 열전 전압을 최소화하기 위해 어떤 조치를 취하더라도 제거 할 수 없습니다. 열전 전압이 큰 경우에도 저항을 최소화하는 대신 정확한 저항 측정이 가능한 방법을 사용하는 것이 좋습니다.

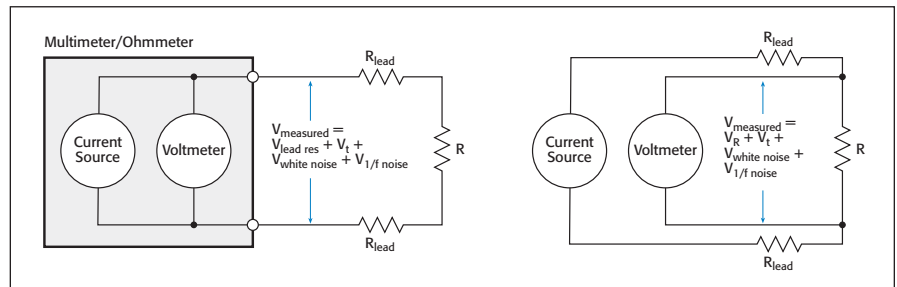


그림 1 : 왼쪽의 회로도 는 표준 DC 저항 측정 설정을 보여줍니다. 4 개의 리드를 사용하여 표준 측정 설정을 회로도 오른쪽으로 변경하면 리드 저항으로 인한 오류가 제거됩니다.

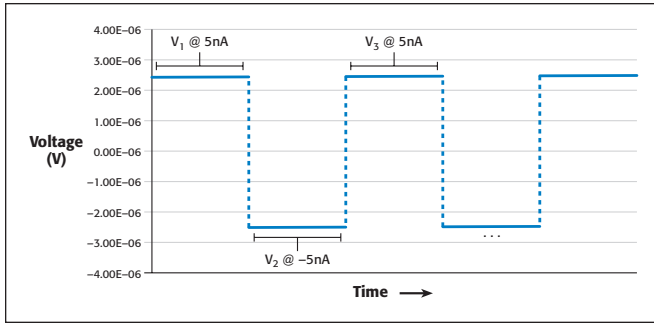


그림 2a : 그래프는 열전 전압 오류없이 전압을 측정하는 교대 3 점 델타 방법을 보여줍니다.

### 항 측정의 델타 방법

일정한 열전 전압을 제거하는 한 가지 방법은 델타 방법을 사용하는 것입니다. 델타 방법은 전압 측정이 먼저 양극에서 테스트 후 음극에서 이루어집니다. 수정 된 기술을 사용하여 열전 전압의 변화를 보상 할 수 있습니다. 단기적으로 열전 드리프트는 선형 함수로 근사 할 수 있습니다. 연속 전압 판독 값의 차이는 열전 전압의 기울기 또는 변화율입니다. 이 기울기는 일정하므로 전류 소스를 3 회 교대로 두 번의 델타 측정을 수행하여 취소 할 수 있습니다. 하나는 음수 단계와 하나는 양수 단계입니다.

선형 근사가 유효 하려면 전류 소스가 빠르게 교대해야 하고 전압 계가 짧은 시간 내에 정확한 전압을 측정해야 합니다. 이러한 조건이 충족되면 3 단계 델타 기술로 열전기 오프셋 및 드리프트의 영향을 받지 않는 의도 된 신호의 정확한 전압 판독 값을 얻을 수 있습니다. 하나의 3 단계 델타 사이클에 대한 수학 분석은 이 기법이 회로의 온도 차이를 보상하여 측정 오류를 줄이는 방법을 보여줍니다.

그림 2a의 예를 고려하십시오.  
시험 전류 =  $\pm 5nA$ ; 장치 =  $500\Omega$  저항

전압 오류를 무시하고 각 단계에서 측정 된 전압은 다음과 같습니다.

$$V1 = 2.5\mu V; V2 = -2.5\mu V; V3 = 2.5\mu V$$

$Vt$ 가 각각의 연속 판독 값으로  $100nV$ 를 상승하는 그림 2b에 표시된 것과 같은 전압 프로파일을 생성하는 방식으로 온도가 단계적으로 선형 적으로 증가한다고 가정 해 봅시다.

그림 2b에서 볼 수 있듯이 전압계로 측정 된 전압에는 회로의 열전 전압 증가로 인한 오류가 포함되며 더 이상 동일한 크기가 아닙니다.

그러나 측정 간의 절대 차이는  $100nV$ 로 일정 오류이므로 이를 용어 취소 할 수 있습니다.

첫 번째 단계는 델타 전압을 계산하는 것입니다.  
첫 번째 델타 전압 ( $Va$ )은 다음과 같습니다.  
 $Va =$  음의 진행 단계 =  $(V1 - V2) / 2 = 2.45 \mu V$

두 번째 델타 전압 ( $Vb$ )은 양의 진행 단계에서 이루어지며 다음과 같습니다.  
 $Vb =$  양의 단계 =  $(V3 - V2) / 2 = 2.55 \mu V$

열전 전압은  $Va$ 의 음의 오차 항과  $Vb$ 의 계산에서 양의 오차 항을 추가합니다. 열 드리프트가 선형 일 때 이러한 오차 항의 크기는 같습니다.

따라서  $Va$ 와  $Vb$ 의 평균을 취하여 오류를 취소 할 수 있습니다.

$$Vf = \text{최종 전압 판독 값} = (Va + Vb) / 2 \\ = \frac{1}{2} [(V1 - V2) / 2 + (V3 - V2) / 2] \\ = 2.5\mu V$$

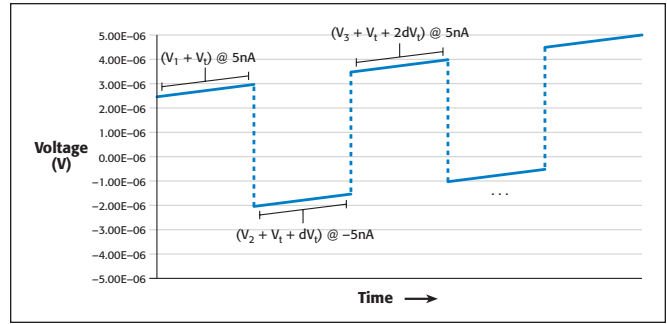


그림 2b : 선형으로 증가하는 온도는 변화하는 열전 전압 오류를 생성하며, 이는 3 점 델타 방법으로 제거됩니다.

델타 기술은 열전 전압 변화로 인한 오류를 제거합니다. 따라서 전압 계 측정은 자극 전류만으로 유도 된 전압입니다. 교대가 계속됨에 따라 모든 연속 판독 값은 가장 최근의 3 가지 A/D 변환의 평균입니다.

고정밀 저항 측정에는 3 단계 델타 기술이 가장 적합합니다. 그림 3은 약  $100$  초에 걸쳐  $10nA$  테스트 전류로 이루어진  $100\Omega$  저항의  $1,000$  측정을 비교합니다. 이 예에서 열전 전압의 변화율은  $7\mu V/s$ 를 넘지 않습니다. 2 단계 델타 기술은 열전 오류 전압이 변동함에 따라  $30\%$  변동합니다. 반대로, 3 단계 델타 기술은 노이즈가 훨씬 적습니다. 측정은 테스트 회로의 열전 변화에 영향을 받지 않습니다.

### 장비 요구 사항

3단계 델타 방법의 성공 여부는 짧은 시간 간격으로 볼 수 있는 열 드리프트의 선형 근사에 따라 달라집니다. 이 근사를 위해서는 측정주기 시간이 테스트 시스템의 열 시간 상수보다 빠릅니다.

이것은 사용되는 전류원 및 전압계에 대한 특정 요구 사항을 부과합니다. 전류 소스는 균일 한 시간 간격으로 빠르게 교대해야 열전 전압이 각 측정간에 동일한 양으로 변경됩니다.

전압계는 전류원과 긴밀하게 동기화 되어야 하며 짧은 시간 간격으로 정확한 측정을 수행 할 수 있습니다. 동기화는 계측기 간의 하드웨어 핸드 셰이킹을 선호하므로 전압계는 전류 소스가 정산 된 후에만 전압 측정을 수행 할 수 있으며 전압 측정이 완료 될 때까지 전류 소스가 극성을 전환하지 않습니다.

전압계의 측정 속도는 총 사이클 시간을 결정하는 데 중요합니다. 더 빠른 전압 측정은 더 짧은 사이클 시간을 의미합니다. 안정적인 저항 측정을 위해 전압계는 저잡음 특성을 희생하지 않고 이 속도를 유지해야 합니다. 저전력 애플리케이션에서 전류 소스는 디바이스의 최대 전력 정격을 초과하지 않도록 낮은 전류 값을 출력 할 수 있어야 합니다. 이 기능은 중간 정도의 높은 임피던스 장치에 특히 중요합니다.



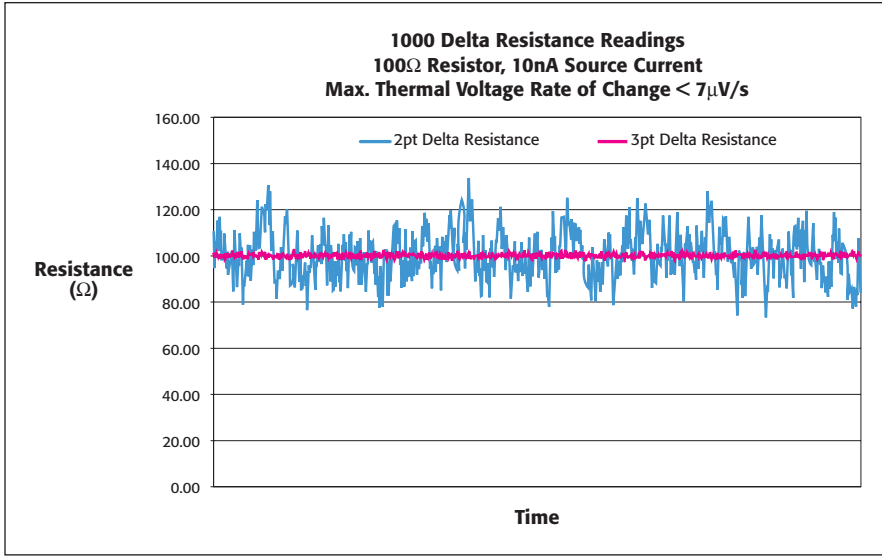


그림 3 : 2 포인트 및 3 포인트 델타 방법을 적용한 결과를 비교 한 그래프는 3 포인트 방법을 사용하여 상당한 노이즈 감소를 보여줍니다.

### 차동 컨덕턴스

솔리드 스테이트 및 나노 스케일 디바이스를 특성화 하기 위한 또 다른 중요한 측정 기술은 차동 컨덕턴스입니다. 이러한 자료의 경우에는 옴의 법칙으로 단순화되는 경우가 거의 없습니다. 이러한 비선형 장치의 경우 저항은 더 이상 상수가 아니므로 모든 점에서 해당 I-V 곡선의 기울기를 자세히 측정해야 합니다.

이 미분을 차동 컨덕턴스  $dG = di / dv$  (또는 그 역, 차동 저항  $dR = dv / di$ )라고 합니다.

상당한 컨덕턴스가 흥미로운 기본 이유는 컨덕턴스가 전자가 가장 활동적인 전압 (또는 보다 정확하게는 전자 에너지에서 eV)에서 최대에 도달하기 때문입니다. 다른 분야에서, 이 측정은 전자 에너지 분광법, 터널링 분광법 또는 상태 밀도라고 할 수 있습니다.

일반적으로 연구자들은 두 가지 방법 중 하나를 사용하여 미분 컨덕턴스 측정을 수행합니다. 계산 된 미분으로 I-V 곡선을 얻거나 AC 기술을 사용합니다. I-V 곡선 방법은 하나의 소스와 하나의 측정 기기 만 필요하므로 조정 및 제어가 상대적으로 쉽습니다. 전류 전압 스위치 이루어지고 수학적 미분이 발견됩니다.

그러나 수학적 미분을 취하면 측정 노이즈가 증폭되므로 테스트를 여러 번 실행해야 하며 미분 값을 계산하기 전에 곡선을 부드럽게 하기 위해 평균을 내야 합니다.

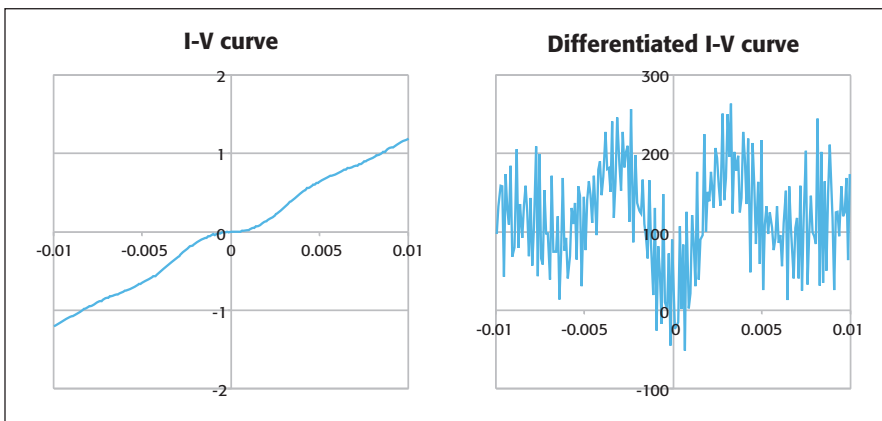


그림 5 : 차동 컨덕턴스 AC 시스템은 최대 6 개의 구성 요소를 선택할 수 있습니다. 그러나 측정에 따른 것입니다.

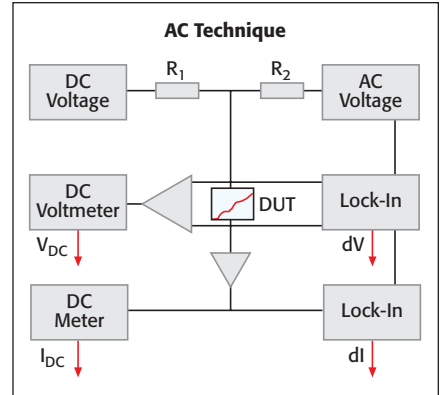


그림 5 : 차동 컨덕턴스를 얻기 위한 AC 기술은 최대 6 개의 구성 요소를 사용할 수 있으므로 I-V 곡선 방법보다 훨씬 복잡한 설정이 가능합니다. 그러나 측정에도 도입되는 노이즈의 양이 줄어 듭니다.

이로 인해 테스트 시간이 길어집니다. AC 기술은 노이즈 및 테스트 시간을 줄입니다. 스위프 DC 바이어스에 저 진폭 AC 사인파를 중첩시킵니다. 여기에는 많은 장비가 필요하며 제어 및 조정하기가 어렵습니다. 이러한 시스템을 조립하려면 시간이 많이 걸리고 전기 회로에 대한 광범위한 지식이 필요합니다. 따라서 AC 기술은 소음이 약간 낮아 지지만 훨씬 더 복잡합니다.

그러나 단순 및 저잡음 인 차동 컨덕턴스 측정을 얻는 또 다른 방법이 있습니다. 이 기술에는 DC 및 AC 구성 요소를 하나의 계측기로 결합하는 전류 소스가 포함됩니다. 계측기는 실제 전류 소스이므로 2 차 전류 측정을 수행 할 필요가 없습니다. 그림 7은 차동 컨덕턴스 측정에서 공급되는 전류를 보여줍니다. 파형은 교류와 계단 전류로 나눌 수 있습니다.

델타 방법에서와 정확히 동일한 계산을 사용하여 계단의 각 지점에서 측정하여 정확한 저항 또는 컨덕턴스 측정을 수행 할 수 있습니다. 3 단계 델타 기술은 선형 적으로 표류하는 오프셋을 제거하므로 선형 적으로 변화하는 계단의 영향에 영향을 받지 않습니다. 또한, 이 방법에 사용 된 나노 전압계는 교번 주파수에서 락-인 증폭기보다 잡음이 적습니다.



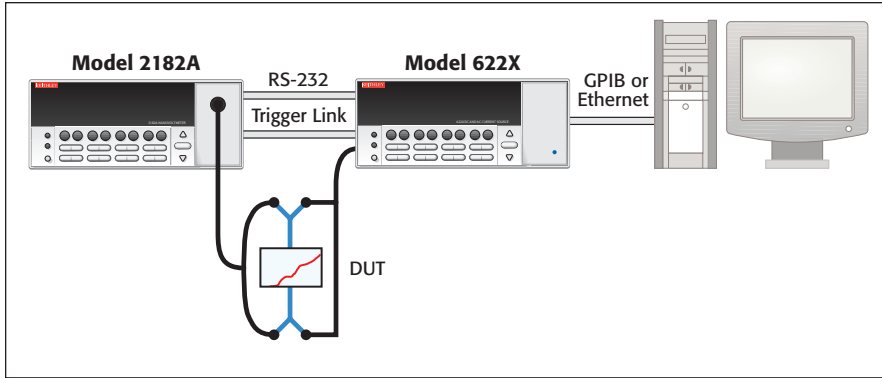


그림 6 : AC 기법에 사용 된 모든 계측기를 통합 한 두 개의 계측기를 사용하여 차동 컨덕턴스 측정을 수행합니다.

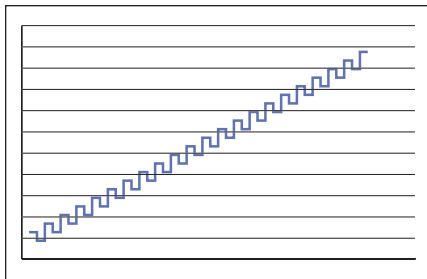


그림 7 : 새로운 기술에 사용 된 파형은 교류 전류와 계단 전류를 결합한 선형 계단 기능입니다.

이 방법에는 몇 가지 이점이 있습니다. 하나는 높은 컨덕턴스 영역에서 동일한 전류 단계로 스위프를 소싱하여 더 많은 데이터 포인트를 얻는다는 것입니다. 이 영역은 연구자들에게 가장 관심이 있고 자세한 데이터를 제공합니다. 또한 전류를 공급하고 전압을 측정하는 계측기 하나만 있으면 장비 설정이 크게 간소화됩니다.

마지막으로 노이즈 감소로 테스트 시간을 1 시간에서 5 분으로 단축 할 수 있습니다.

## 결론

열전 EMF는 종종 저 저항 / 저전력 저항 측정에서 주요 오류 원인입니다. 이 오류는 3 점 전류 반전 기술을 사용하여 거의 완전히 제거 될 수 있습니다. 이 새로운 기술을 사용하면 저항 측정 시스템의 배선에서 열에 의한 전압 노이즈를 최소화하기 위해 더 이상 주의를 기울일 필요가 없으므로 측정 프로세스가 크게 간소화됩니다.

차동 컨덕턴스 측정에 동일한 기술을 적용하면 노이즈 및 테스트 복잡성이 크게 줄어 듭니다.

KEITHLEY

**NUBICOM**  
(주)누비콤

서울본사

서울특별시 영등포구 경인로 775(문래동 3가, 에이스하이테크시티 3동 2층 201호)

TEL: 070-7872-0701

FAX: 02-2167-3801

E-mail: sales@nubicom.co.kr

대전지사

대전광역시 유성구 덕명동로 22번길 10

TEL: 070-7872-0712

FAX: 02-2167-3801

mail: jbkim@nubicom.co.kr