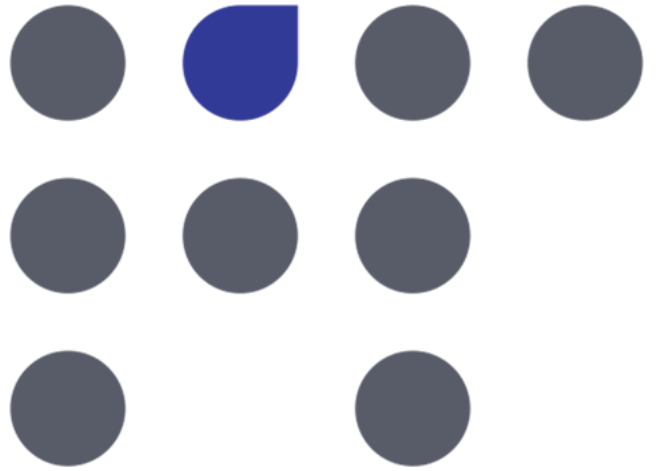




리니어 DC 전원 공급 장치 정밀 사양 분석 및 엔지니어링 가이드

Application Note

1. 서론: 정밀 전력 공급 사양의 전략적 가치

가변 DC 전원 공급 장치는 단순한 전력 전달 도구를 넘어, 정밀 계측 시스템의 신뢰성을 결정짓는 핵심적인 엔지니어링 요소입니다. 전원 공급 장치는 저항성, 유도성, 용량성 부하뿐만 아니라 저임피던스에서 고임피던스에 이르는 다양한 부하 환경 속에서도 안정적이고 정밀한 전력을 공급해야 하는 기술적 임무를 수행합니다.

엔지니어가 제조사의 사양서를 정확히 해석하고 하드웨어의 한계를 이해하는 것은 설계 및 테스트 결과의 재현성을 확보하기 위한 당위적 절차입니다. 전원 공급 장치의 성능 임계치가 곧 전체 시스템의 측정 불확도를 정의하기 때문입니다. 이러한 정밀 성능을 가능하게 하는 리니어 전원 공급 장치의 내부 아키텍처와 동작 원리에 대한 분석으로부터 논의를 시작하고자 합니다.

2. 리니어 전원 공급 장치의 아키텍처 및 동작 모드 분석

리니어 전원 공급 장치는 직접적인 피드백 제어 루프를 통해 우수한 부하 레귤레이션과 낮은 전동 소음을 구현합니다. 시스템 블록 간의 유기적 상호작용은 고정밀 제어의 근간이 됩니다.

2.1 제어 루프 및 시스템 구조 (그림 1 참조)

리니어 레귤레이터의 핵심 구조는 마이크로프로세서와 고성능 변환기 간의 협업으로 이루어집니다. 사용자 인터페이스를 통해 설정된 디지털 값은 DAC(Digital-to-Analog Converter) 를 거쳐 아날로그 기준 전압으로 변환되며, 이는 리니어 레귤레이터의 출력 레벨을 결정하는 기준이 됩니다. 동시에 출력단에 배치된 ADC(Analog-to-Digital Converter) 는 실제 인가되는 전압과 전류를 실시간으로 모니터링하여 피드백 제어 루프를 완성하고, 디스플레이에 리드백(Readback) 수치를 제공합니다.

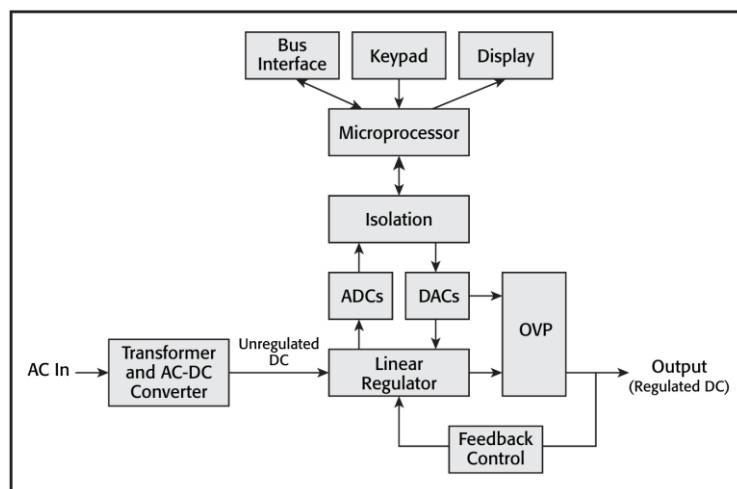


그림 1. 프로그래밍이 가능한 리니어 전원 공급 장치의 간략화된 블록 다이어그램

2.2 CV(Constant Voltage) 및 CC(Constant Current) 모드

동작 모드는 부하 저항(Resistance)과 사용자 설정값의 관계에 의해 결정됩니다.

- **CV 모드:** 부하 임피던스가 충분히 높을 때, 장비는 설정된 전압을 일정하게 유지하며 전류는 부하에 의해 결정됩니다.
- **CC 모드:** 부하 임피던스가 낮아져 전류가 설정된 제한치에 도달하면, 장비는 전류를 고정하고 전압을 부하 임피던스에 맞춰 가변시킵니다.

이러한 제어 루프의 하드웨어적 정밀도는 출력의 정확도와 해상도를 결정짓는 핵심 변수가 됩니다.

3. 정밀도(Accuracy) 및 해상도(Resolution)의 사양 해석

전원 공급 장치의 성능 평가 시 설정(Setting) 사양과 리드백(Readback) 사양은 반드시 분리되어야 합니다. 리드백 정밀도가 우수하다고 해서 설정 정밀도가 반드시 동일한 수준을 보장하는 것은 아니기 때문입니다.

3.1 정밀도 산출식 및 하드웨어적 기원

설정 정밀도는 출력 파라미터가 국제 표준에 정의된 이론적 수치와 얼마나 일치하는지를 나타냅니다. 출력 오차의 주요 원인은 DAC의 양자화 오차(Quantization error)를 포함한 내부 변환 회로의 이득 및 오프셋 오류에서 기인합니다.

- 정밀도 공식: $\pm (\% \text{ of setting} + \text{offset})$
- 산출 사례 (Keithley 2200-32-3): 전압 설정 정밀도가 $\pm 0.03\% + 3 \text{ mV}$ 인 모델을 5V로 설정할 경우, 발생 가능한 불확도는 $5\text{V} * 0.0003 + 0.003\text{V} = 0.0045\text{V}(4.5\text{mV})$ 입니다. 즉, 실제 출력은 4.9955V에서 5.0045V 범위 내에 존재하게 됩니다.

3.2 해상도 결정 요인 및 기술적 한계

설정 해상도는 장비가 제어 가능한 최소 증분 단위를 의미하며, DAC의 비트(Bit) 수와 사용자 인터페이스의 자릿수에 의해 결정됩니다. 이론적으로 비트 수가 많을수록 세밀한 제어가 가능하나, 실제 엔지니어링 환경에서는 오프셋 및 이득 보정 과정에서 유효 해상도가 감소할 수 있습니다. 따라서 해상도를 한 단계 조정하더라도 내부 보정 알고리즘에 의해 실제 출력에는 변화가 나타나지 않을 수 있다는 점을 유의해야 합니다.

3.3 정밀도 및 해상도 데이터 비교 (Keithley 2200-32-3 기준)

사양 항목	전압(Voltage)	전류(Current)
설정 정밀도	$\pm 0.03\% + 3 \text{ mV}$	$\pm 0.05\% + 2 \text{ mA}$
설정 해상도	1 mV	0.1 mV
리드백 정밀도	$\pm 0.02\% + 3 \text{ mA}$	$\pm 0.05\% + 2 \text{ mA}$
리드백 해상도	1 mV	0.1 mV

정밀한 설정이 완료되었더라도, 출력 단자에서 부하단(DUT)까지 전압의 무결성을 유지하기 위해서는 배선 저항에 대한 대책이 필수적입니다.

4. Remote Sense 기술을 활용한 전압 강하 보상

전원 공급 장치와 DUT 사이의 케이블 저항은 전류 흐름에 따른 전압 강하를 유발하여 측정 오차를 발생시킵니다. 이를 극복하기 위해 Figure 3와 같은 Remote Sense(4-wire) 연결 방식이 권장됩니다.

1. 원리: 전류를 공급하는 소스(Source) 리드와 전압을 감지하는 센스(Sense) 리드를 분리합니다.
2. 보정 메커니즘: 센스 리드는 장비 내부의 하이 임피던스 볼트미터 회로에 연결됩니다. 이 회로에는 전류가 거의 흐르지 않으므로 센스 리드 자체의 전압 강하는 무시 가능합니다.
3. 효과: 전원 장치는 센스 리드에서 측정된 DUT 단자의 실제 전압을 피드백 받아, 케이블에서 손실된 전압만큼 출력을 높여 실시간으로 보정합니다.

이러한 고정적 오차 보정 외에도 외부 변동 요인에 대한 장비의 능동적 대응 능력을 평가해야 합니다.

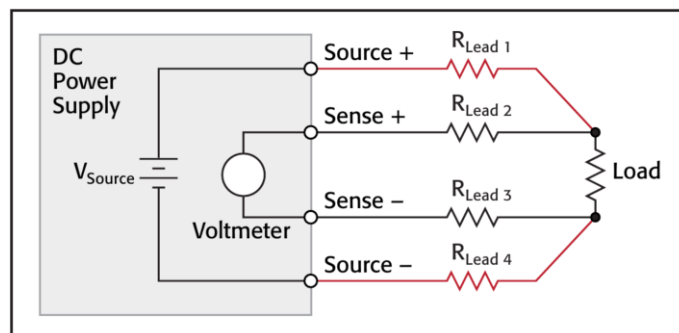


그림 2. 원격 감지(Remote Sense) 기능은 전류를 공급하는 소스 회로와 전압을 측정하는 센스 회로를 분리함으로써 리드선 저항(Lead Resistance)에 의한 영향을 제거합니다.

5. 안정성 사양(Stability Specifications)의 심층 평가

안정성 사양은 부하 변동, AC 라인 전압 변화, 온도 드리프트와 같은 외부 변수에도 출력을 일정하게 유지하는 능력을 정의합니다.

- **부하 레귤레이션(Load Regulation):** 부하 임피던스 급변 시의 출력 안정성을 의미합니다. Figure 4의 파형을 분석하면, Keithley 2200-32-3 모델은 0A에서 2.8A까지의 급격한 부하 변동 상황에서도 32V 전체 부하 기준 5.2mV 이내의 극도로 안정적인 전압 유지를 보여줍니다($\pm 0.01\% + 2\text{mV}$ 사양 준수).
- **라인 레귤레이션(Line Regulation):** AC 입력 전압 및 주파수가 허용 범위 내에서 변동할 때 DC 출력에 미치는 영향입니다. 이는 전력망이 불안정한 산업 환경에서 필수적인 지표입니다.
- **온도 드리프트:** 대부분의 정밀 사양은 25°C ($20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$) 기준이며, 이 범위를 벗어날 경우 온도 계수에 따른 추가적인 오차가 발생하므로 환경 제어가 중요합니다.

시간 영역의 안정성 분석에 이어, 주파수 영역에서의 AC 특성 및 과도 응답 특성을 고찰할 필요가 있습니다.

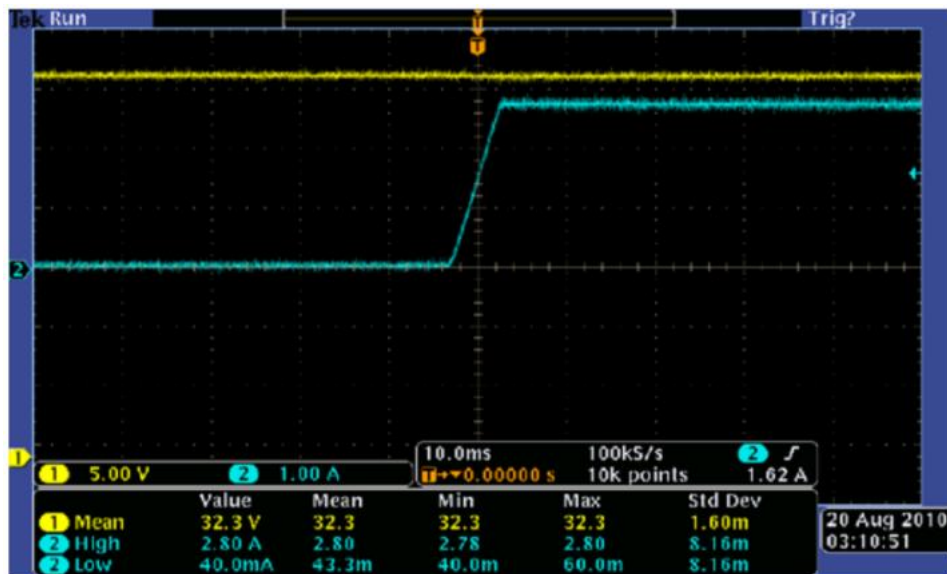


그림 3. 이 오실로스코프 화면은 Keithley 2200-32-3의 부하 전류가 0A에서 2.8A로 변할 때 출력 전압의 변동을 보여줍니다. 전압은 전류 변동 과정 내내 안정적으로 유지됩니다.

6. AC 특성: PARD(Ripple and Noise) 및 과도 응답(Transient Response)

DC 출력에 포함된 원치 않는 AC 성분은 민감한 회로의 오동작을 유발하는 주요 원인이 됩니다.

6.1 PARD 분석 (Ripple and Noise)

PARD는 주기적 성분인 리플(Ripple)과 무작위 성분인 노이즈(Noise)의 복합체입니다.

- 주파수 영역의 관점: 주파수 영역에서 분석 시 리플은 특정 주파수의 스퓨리어스 응답(Spurious response) 으로 나타나며, 노이즈는 전체적인 기저선 상승(Baseline increase) 으로 나타납니다(그림 4, 5 참조).
- 대역폭의 민감도: PARD 사양은 측정 대역폭에 의존합니다. Keithley 2200-32-3은 7MHz 대역폭에서 1 mVRMS를 보장하나, 20MHz 대역으로 확장 시 사양은 3 Mvrms 로 증가하므로 설계 시 필터링 대역폭을 고려해야 합니다.

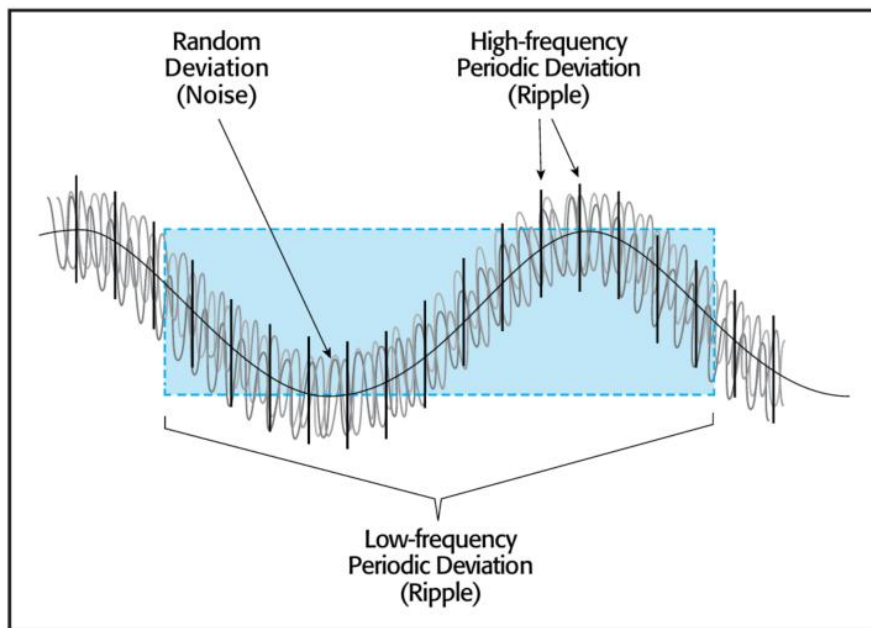


그림 4. 해당 그림은 주기적(리플) 왜곡과 무작위적(노이즈) 왜곡의 개념을 보여줍니다.

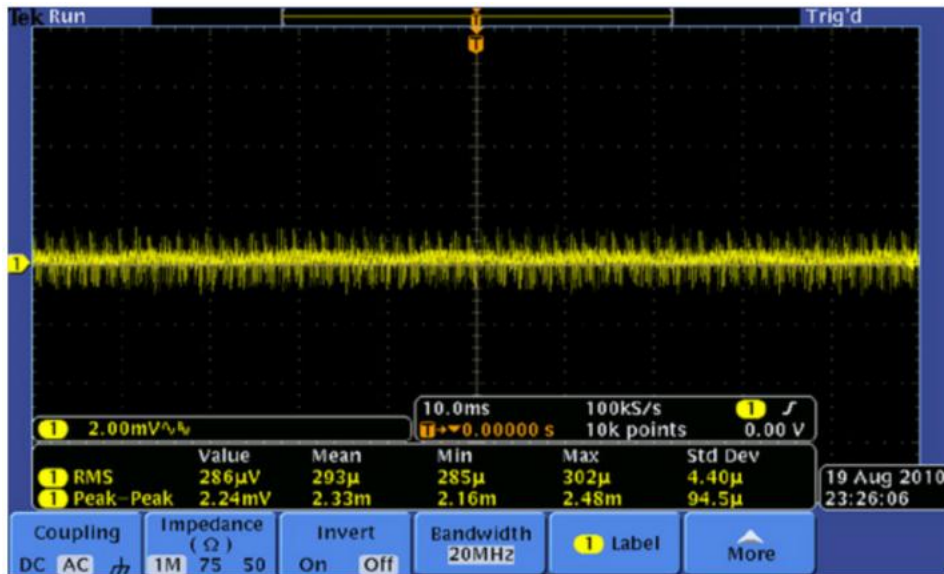


그림 5. 본 노이즈 측정값은 전원 공급 장치가 정격 최대 전류를 공급하는 상태에서 1X 프로브 및 약 7MHz의 대역폭을 사용하여 측정되었습니다.

6.2 과도 응답 (Transient Response)

과도 응답은 부하 단계 변화 후 전압이 목표치 내로 안정화되는 시간(Settling Time)을 규정합니다. 리니어 전원 장치는 출력단에 대용량 병렬 커패시턴스를 보유하고 있으므로, 부하 저항과 결합하여 시상수(Time Constant)를 형성합니다. 따라서 응답 시간은 부하 임피던스에 따라 가변적이며, 이는 자동화 테스트의 처리 속도(Throughput)에 직접적인 영향을 미칩니다. (Table 1 참조: 0.1 A- > A 부하 변화 시 400µs 이내 안정화) 단일 채널의 한계를 넘어선 시스템 확장 시에는 추가적인 기능적 고려가 요구됩니다.

	최종값의 75mV 이내로 안정화되는 데 소요되는 시간
부하 변동 (0.1A → 1A)	< 400µs
설정 변경 (10Ω 부하시, 1V → 11V)	< 35ms
설정 변경 (10Ω 부하시, 11V → 1V)	< 35ms

7. 시스템 확장 및 고급 기능 활용 (Performance Features)

복잡한 테스트 시나리오를 충족하기 위해 현대적인 리니어 전원 공급 장치는 다음과 같은 고급 기능을 제공합니다.

- **절연 출력(Isolated Outputs):** 각 채널이 독립적인 공통 전위(Common Reference)를 가짐으로써, 의료 기기 테스트나 광절연기(Opto-isolator)를 사용하는 회로와 같이 전위가 분리된 시스템을 동시에 테스트할 수 있습니다.
- **Series/Parallel 동작:** 고전압 또는 고전류가 필요한 경우 채널을 결합합니다. 이때 채널이 절연되지 않고 공통 낮은 기준점(Common low reference point)을 공유할 경우 병렬 연결이 물리적으로 불가능하며, 이를 무시할 경우 쇼트 및 장비 손상이 발생할 수 있습니다.
- **Tracking 기능:** 바이폴라 회로 테스트 시 정/부 전압 채널을 동기화하여 제어합니다. 가변 비율(Variable Ratio) 트래킹을 통해 두 전압 간의 정밀한 비율 유지가 가능합니다.

8. 결론: 계측 신뢰성 확보를 위한 품질 보증 기준

사양서의 수치가 실제 현장에서의 성능으로 구현되기 위해서는 제조사의 엄격한 품질 보증 체계가 전제되어야 합니다. 아래 항목의 내용을 기반으로 루틴을 생성해 개발에 임하시길 추천드립니다.

1. **독립적 인증 확인:** CSA, UL, VDE와 같은 국제 공인 기관의 안전 및 성능 인증은 제조사의 사양이 제3자에 의해 검증되었음을 의미하는 독립적인 확인(Independent confirmation) 지표입니다.
2. **정기 교정 및 추적성:** 장비 노후화에 따른 성능 변화를 관리하기 위해 1년 단위의 정기적인 교정(Calibration) 사이클을 준수하고, 국제 표준에 대한 추적성(Traceability)을 유지해야 합니다.

공학적 신뢰성은 엄격한 표준 준수와 정기적 검증을 통해서만 완성됩니다.

<참고문헌>

KEITHLEY - 3137 - Understanding Linear Power Supply Specifications