



보데 선도 기능 활용 가이드:
MHO5000 시리즈 오실로스코프를 이용한 안정성 분석
(Bode Plot Application Guide:
Stability Analysis Using MHO5000 Series Oscilloscopes)

Application Note

Introduction / 서론: 목적 및 적용 범위

본 가이드는 RIGOL MHO5000 시리즈 고해상도 디지털 오실로스코프의 보데 선도(Bode Plot) 기능을 활용하여, 스위칭 전원 공급 장치(SMPS)의 제어 루프 안정성을 정량적이고 재현성 있게 측정하기 위한 표준 절차를 규정합니다.

본 절차는 SMPS의 설계 검증 및 디버깅 단계에서 필수적인 주파수 응답 분석(FRA)을 체계적으로 수행할 수 있도록 설계되었습니다. 이를 통해 엔지니어는 위상 여유(Phase Margin)와 이득 여유(Gain Margin)를 정확히 파악하여 제품의 신뢰성을 확보할 수 있습니다.

본 문서는 SMPS 개발 엔지니어 및 품질 검증 기술자를 주요 독자층으로 하며, 본 절차를 준수함으로써 측정 결과의 정확성과 데이터 신뢰성을 극대화할 수 있습니다.

1. 루프 분석의 이론적 배경

루프 분석은 스위칭 전원 공급 장치의 동적 성능과 안정성을 평가하는 데 필수적인 과정입니다. 이 분석의 핵심은 보데 선도(Bode Plot)를 사용하여 시스템의 주파수 응답, 즉 다양한 주파수의 입력 신호에 대한 시스템의 이득(Gain)과 위상(Phase) 변화를 시각적으로 분석하는 것입니다. 이를 통해 시스템이 불안정해질 수 있는 잠재적 위험을 사전에 파악하고 최적의 성능을 위한 설계를 검증할 수 있습니다.

1-1. 피드백 제어 시스템

스위칭 전원 공급 장치는 외부의 부하 변동이나 입력 전압 변화에도 안정적인 출력 전압을 유지하기 위해 피드백 제어 루프를 사용하는 대표적인 시스템입니다. 이 시스템의 안정성은 개방 루프 전달 함수 $T(s) = G(s) * H(s)$ 에 의해 결정됩니다.

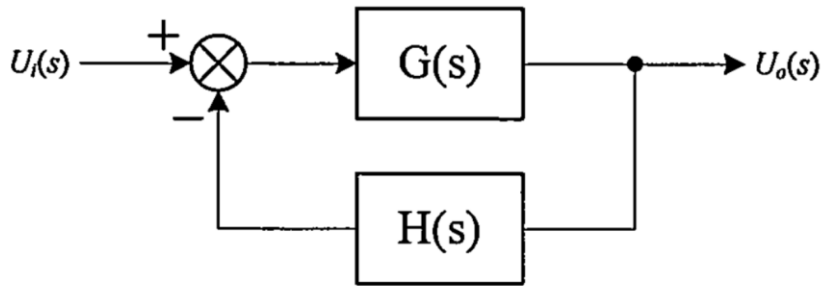


그림1. 피드백 회로 시스템

폐쇄 루프 전달 함수는 다음과 같이 표현됩니다.

$$U_o(s) / U_i(s) = G(s) / (1 + G(s) * H(s)) = G(s) / (1 + T(s))$$

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)*H(s)} = \frac{G(s)}{1+T(s)}$$

그림2. 폐쇄 루프 전달 함수

이 식에서 분모가 0이 될 때, 즉 $1 + T(s) = 0$ (다시 말해, $T(s) = -1$)일 때 시스템의 출력은 무한대로 발산하여 불안정해집니다. 이 조건은 개방 루프 전달 함수의 이득 크기가 1(0dB)이고 위상 지연이 -180° 일 때 동시에 만족됩니다. 따라서 루프 분석은 이 조건에 얼마나 근접하는지를 측정하여 시스템의 안정성을 평가하는 것입니다.

1-2. 보데 선도(Bode Plot)

보데 선도는 시스템의 주파수 응답을 두 개의 그래프로 나타낸 것입니다.

- 이득 선도(Magnitude Plot): 수평축은 로그 스케일의 주파수(ω)를, 수직축은 데시벨(dB) 단위의 이득($20\log|T(s)|$)을 나타냅니다.

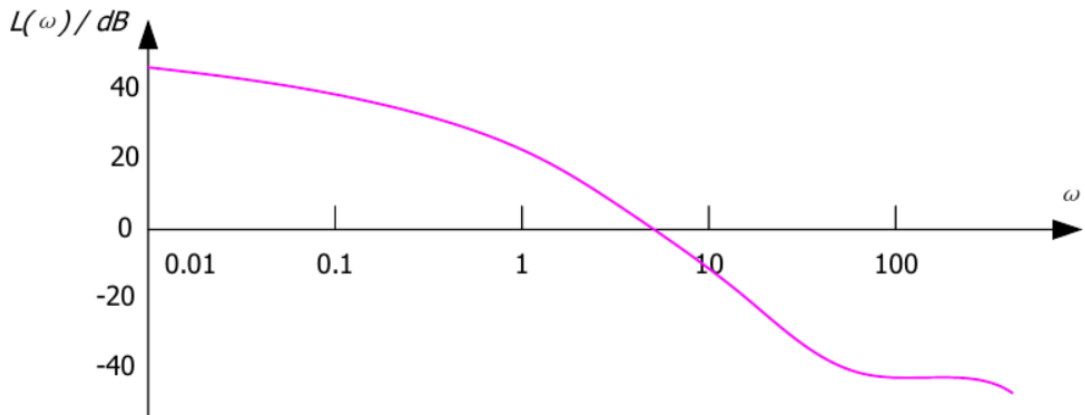


그림3. 이득 선도(Magnitude Plot)

- 위상 선도(Phase Plot): 수평축은 이득 선도와 동일한 로그 스케일의 주파수(ω)를, 수직축은 도($^{\circ}$) 단위의 위상 변이($\angle T(s)$)를 나타냅니다.

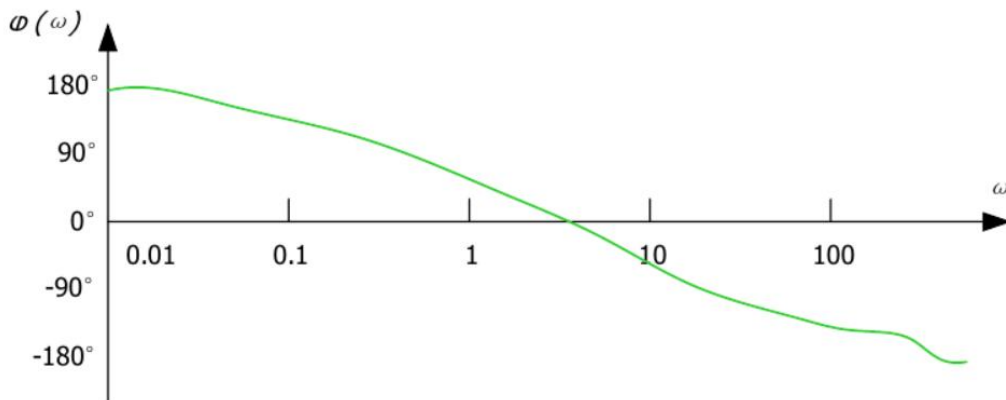


그림4. 위상 선도(Phase Plot)

이 두 그래프를 통해 엔지니어는 전체 주파수 대역에 걸쳐 시스템이 어떻게 반응하는지 직관적으로 파악할 수 있습니다.

1-3. 안정성 지표: 위상 여유(PM) 및 이득 여유(GM)

보데 선도에서 시스템 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 다음 세 가지 핵심 지표를 사용합니다.

- 위상 여유(Phase Margin, PM):**
 교차 주파수에서 위상이 -180° 에 도달하기까지의 여유 각도를 의미합니다. PM은 시스템의 안정성과 응답 속도에 직접적인 영향을 미칩니다. PM이 클수록 시스템은 안정적이지만 응답 속도는 느려지는 경향이 있습니다.
- 이득 여유(Gain Margin, GM):**
 위상이 -180° 가 되는 지점에서 이득이 $1(0\text{dB})$ 에 도달하기까지의 여유 크기를 의미하며, dB 단위로 표현됩니다. 양수(+)의 GM은 시스템이 안정적임을, 음수(-)의 GM은 시스템이 불안정함을 나타냅니다.
- 교차 주파수(Crossover Frequency)**
 시스템의 개방 루프 이득이 $1(0\text{dB})$ 이 되는 주파수입니다. 이 주파수는 시스템의 응답 속도를 나타내는 중요한 지표입니다.

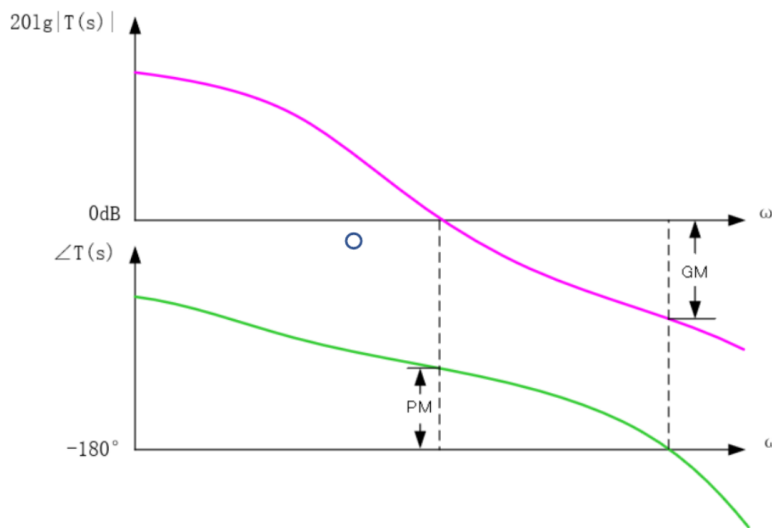


그림5. 보데선도 그래프

이러한 이론적 배경을 바탕으로, 다음 장에서는 실제 테스트 환경을 구축하는 데 필요한 장비와 절차에 대해 알아보겠습니다.

2. 필수 장비 및 자재

정확하고 안전한 루프 분석 테스트를 수행하기 위해서는 사전에 모든 장비와 자재를 철저히 준비하는 것이 중요합니다. 아래 목록은 루프 테스트를 수행하는 데 필요한 필수 항목들입니다.

- **디지털 오실로스코프: RIGOL MHO5000 시리즈 (예: MHO5054, MHO5104)**
이 모델은 루프 분석에 필수적인 내장형 50MHz 함수/임의 파형 생성기와 보데 선도 기능을 지원합니다.
- **절연 변압기(Isolation Transformer)**
오실로스코프의 파형 생성기 출력(GI 커넥터)과 테스트 대상 회로(DUT) 사이를 전기적으로 분리하는 역할을 합니다. 이는 접지 루프(ground loop) 형성을 방지하여 측정 오류를 최소화하고 안전을 확보하기 위함입니다. 접지 루프는 저수준 신호 측정 시 노이즈를 유입시켜 결과의 신뢰도를 저하시킬 수 있습니다.
- **주입 저항(Injection Resistor, Rinj)**
피드백 루프에 테스트 신호를 주입하기 위한 저항입니다. 시스템 안정성에 미치는 영향을 최소화하기 위해 5Ω ~ 10Ω 사이의 값을 권장합니다.
- **오실로스코프 프로브 (2개)**
신호 주입 지점과 출력 지점의 전압을 측정하기 위해 필요합니다. (예: RIGOL RP3500A 프로브)
- **테스트 대상 장치(DUT)**
루프 분석을 수행할 스위칭 전원 공급 장치

모든 장비와 자재가 준비되었다면, 다음 단계에 따라 물리적으로 테스트 환경을 구축합니다.

3. 테스트 환경 구축 절차

정확한 측정 결과를 얻기 위해서는 테스트 장비들을 올바른 방법으로 물리적으로 연결하는 것이 매우 중요합니다. 아래 절차는 소스 컨텍스트의 회로 토폴로지 다이어그램을 기반으로 하며, 피드백 루프를 개방하지 않고 간섭 신호를 주입하여 시스템의 응답을 측정하는 것을 목표로 합니다.

1. 주입 저항 연결

피드백 루프 내에 작은 값의 주입 저항(R_{inj} , 5Ω)을 직렬로 연결합니다. 일반적으로 출력 전압을 감지하는 분압 저항 사이에 위치시키는 것이 가장 효과적입니다. (소스 컨텍스트의 다이어그램에서 빨간색 원으로 표시된 위치 참조)

2. 신호 주입 연결

MHO5000 시리즈 오실로스코프 전면 패널의 GI 커넥터 출력을 절연 변압기에 연결합니다. 절연 변압기의 2차측 출력은 1단계에서 삽입한 주입 저항(R_{inj})의 양단에 병렬로 연결합니다. 이를 통해 오실로스코프의 내장 파형 생성기가 만드는 스위프(swept) 사인파 신호가 피드백 루프에 주입됩니다.

3. 프로브 연결

두 프로브의 접지 클립을 DUT의 접지에 연결하십시오. 채널 1 (Ch1) 프로브는 주입 저항(R_{inj})의 한쪽 끝에 연결하여 주입 신호를 측정하고, 채널 2 (Ch2) 프로브는 R_{inj} 의 다른 쪽 끝에 연결하여 루프의 응답 신호를 측정합니다. Ch1이 입력 소스, Ch2가 출력 소스가 됩니다.

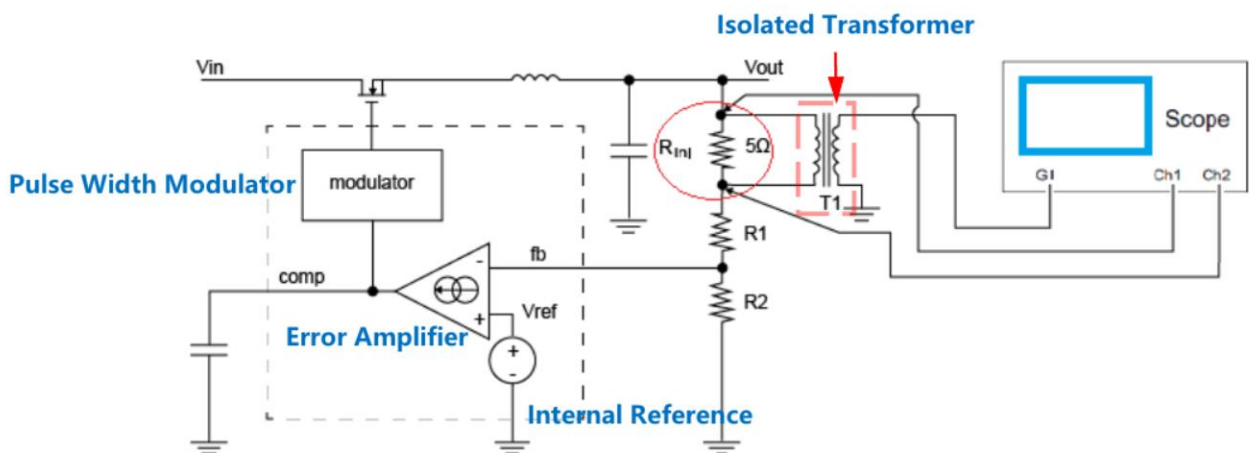


그림6. 테스트 환경 다이어그램

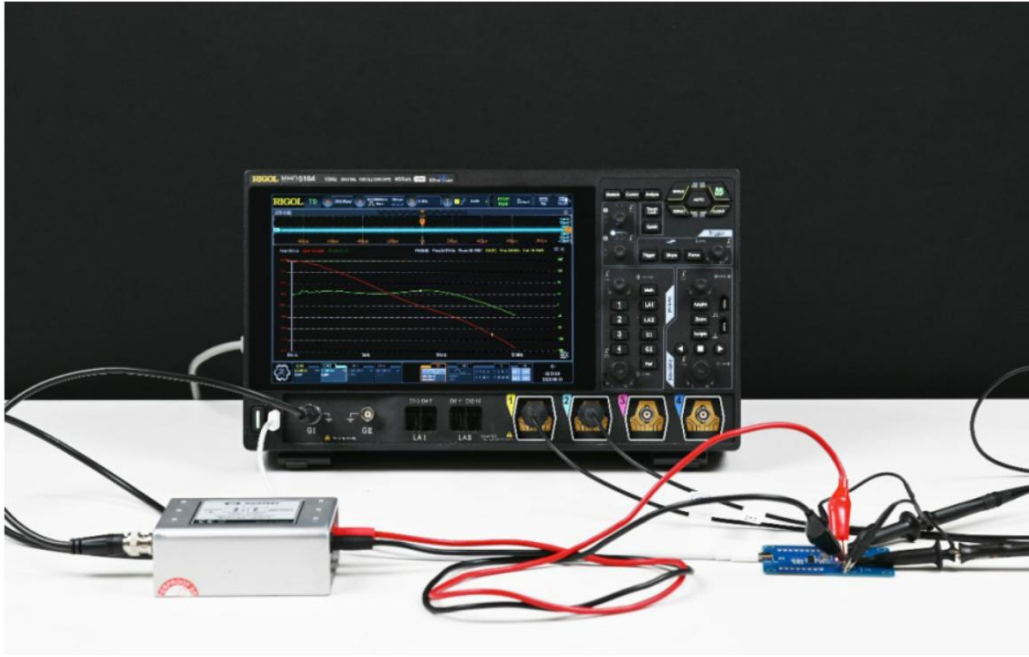


그림7. 테스트 환경 구축 예시

물리적 연결이 완료되었으니, 이제 오실로스코프의 소프트웨어 설정을 통해 실제 테스트를 수행하는 구체적인 운영 절차를 진행합니다.

4. 오실로스코프 설정 및 테스트 실행

MHO5000 시리즈 오실로스코프는 직관적인 터치스크린 인터페이스와 전용 보데 선도 기능을 통해 루프 분석을 간소화합니다. 아래의 체계적인 절차에 따라 오실로스코프를 설정하고 테스트를 실행하십시오.

4-1. 보데 선도 가능 활성화

화면 좌측 하단에 위치한 기능 탐색 아이콘(R 모양 아이콘)을 탭한 후, 메뉴에서 'Bode Plot'을 선택하여 보데 선도 설정 메뉴를 엽니다.

4-2. 스위치 신호 설정

'Ampl/Freq Setting' 탭을 선택하여 루프에 주입할 스위치 신호의 파라미터를 설정합니다. 각 항목을 탭하면 나타나는 숫자 키패드를 사용하여 값을 입력할 수 있습니다.



그림8. 보데 선도 설정 화면

파라미터	정의
Start Freq	스weep 사인파의 시작 주파수 (설정 범위: 10 Hz ~ 3 MHz, 기본값: 100 Hz)
Stop Freq	스weep 사인파의 종료 주파수 (설정 범위: 100 Hz ~ 30 MHz, 기본값: 1 MHz)
Points/decade	10 배 주파수 구간당 표시할 포인트 수 (설정 범위: 10 ~ 100, 기본값: 10)
Amplitude	고정 진폭 모드('Var. Amp.' OFF)에서 사용할 사인파의 전압 진폭
Variant Amplitude	Var.Amp. 키가 켜져 있을 때 다양한 주파수 범위에서 사인파의 전압 크기를 나타냅니다.

- **스weep 유형 (Sweep Type):** 'Basic Setting' 메뉴에서 sweep 유형을 선형(Lin) 또는 로그(Log) 방식으로 선택할 수 있습니다.

4-3. 입/출력 소스 설정

'Basic Setting' 탭에서 테스트 환경 구축 단계에서 연결한 프로브에 해당하는 채널을 지정합니다.

- **입력 소스 (In):** 주입 신호를 측정하는 채널(예: Ch1)을 선택합니다.
- **출력 소스 (Out):** 응답 신호를 측정하는 채널(예: Ch2)을 선택합니다.

4-4. 보데 선도 분석 실행 및 중지

설정이 완료되면 'Operating Status' 옆의 시작 아이콘(▶)을 탭하여 분석을 시작합니다. 오실로스코프는 설정된 주파수 범위에 걸쳐 자동으로 신호를 sweep하고 이득과 위상을 계산하여 보데 선도를 그립니다. 테스트 진행 중에는 일시정지 아이콘(■)이 표시되며, 이를 탭하여 분석을 중단할 수 있습니다. (참고: 테스트가 완료되면 설정 메뉴는 자동으로 닫힙니다.)

4-5. 측정 결과 확인 및 분석

테스트가 완료되면 화면에 보데 선도 결과 창이 표시됩니다.

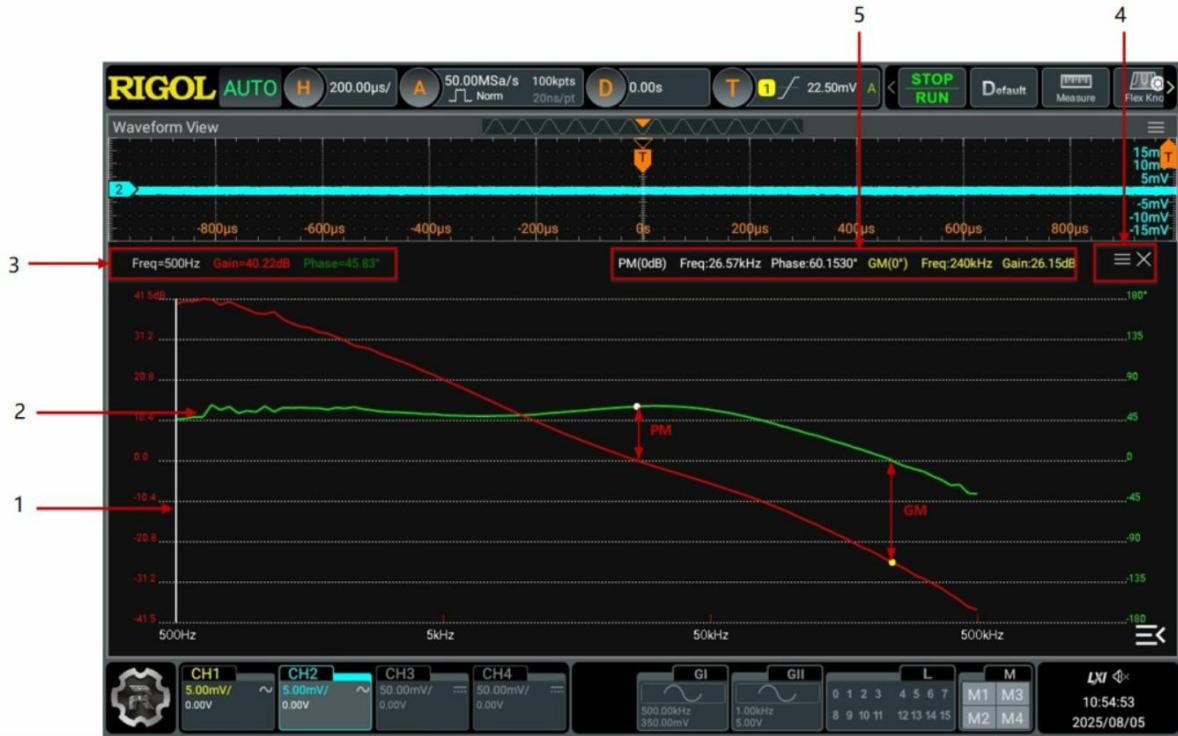


그림9. 보데 선도 결과 화면

• 주요 구성 요소

1. 커서: 다기능 노브를 돌려 특정 주파수로 이동시킬 수 있습니다.
2. 보데 선도 곡선: 빨간색은 이득, 녹색은 위상 곡선을 나타냅니다.
3. 커서 정보: 커서 위치의 주파수(Freq), 이득(Gain), 위상(Phase) 값을 표시합니다.
4. 조작 버튼: 설정 메뉴를 다시 열거나 보데 선도 창을 닫을 수 있습니다.
5. 위상/이득 여유: 자동으로 계산된 위상 여유(PM)와 이득 여유(GM) 값이 표시됩니다.

• 데이터 확인

Disp Type'을 'Chart'로 변경하면, 측정된 모든 주파수 포인트에 대한 이득 및 위상 값을 표 형태로 상세히 확인할 수 있습니다.

Index	Freq	Gain	Phase
1	500Hz	40.22dB	45.83°
2	539.88Hz	40.94dB	46.66°
3	582.95Hz	40.89dB	48.42°
4	629.46Hz	41.54dB	48.21°
5	679.67Hz	41.35dB	62.05°
6	733.9Hz	39.96dB	56.17°
7	792.44Hz	40.86dB	59.97°
8	855.66Hz	39.73dB	52.56°
9	923.92Hz	38.82dB	55.50°
10	997.63Hz	37.83dB	53.98°
11	1.0772kHz	37.60dB	60.58°
12	1.1631kHz	38.23dB	54.29°
13	1.2559kHz	36.31dB	58.77°
14	1.3561kHz	35.25dB	58.53°
15	1.4643kHz	34.38dB	58.98°
16	1.5811kHz	34.11dB	58.27°
17	1.7072kHz	32.96dB	58.30°
18	1.8434kHz	32.64dB	56.51°
19	1.9905kHz	31.70dB	58.90°

그림10. 데이터 확인: 표 형태

4-6. 테스트 결과 저장

측정된 데이터와 그래프는 보고서 작성 등을 위해 저장할 수 있습니다.

- 차트 데이터 저장: 'Save' 메뉴에서 포맷을 *.csv 또는 *.html 로 선택하여 측정 결과를 테이블 형태로 저장할 수 있습니다.
- 이미지 저장: 화면 좌측 하단의 기능 탐색 아이콘을 통해 'Storage' 메뉴로 이동한 후, 포맷을 *.png, *.bmp, 또는 *.jpg 로 선택하여 현재 화면을 이미지 파일로 저장할 수 있습니다.

성공적인 테스트 실행 방법을 숙지했으므로, 이제 측정의 정확도를 한층 더 높이기 위한 전문가의 주요 운영 팁과 권장 사항을 살펴보겠습니다.

5. 주요 운영 지침 및 권장 사항

신뢰도 높은 루프 분석 결과를 얻는 것은 단순히 절차를 따르는 것을 넘어, 시스템의 근본적인 특성을 이해하는 데서 출발합니다. SMPS 설계의 핵심은 시스템 응답 속도와 시스템 안정성 사이의 균형을 맞추는 것입니다. 빠른 응답 속도를 추구하면 안정성이 저하될 수 있고, 과도한 안정성은 시스템의 반응을 둔하게 만듭니다. 아래의 지침들은 이 두 가지 상충하는 목표 사이에서 최적의 지점을 찾기 위한 전문가의 경험적 지식입니다.

- 간섭 신호 주입 위치 선정

주입 저항의 위치는 측정의 성패를 좌우할 수 있습니다.

- 전압 피드백 회로: 일반적으로 출력 전압을 감지하는 분압 저항 사이에 주입 저항을 위치시키는 것이 이상적입니다. 이 위치는 임피던스가 낮아 루프에 미치는 영향을 최소화할 수 있습니다.
- 전류 피드백 회로: 피드백 회로의 뒷단에 주입 저항을 위치시켜야 합니다.

- 주입 저항 값 선택

주입 저항의 값은 기존 회로의 특성을 해치지 않도록 충분히 작아야 합니다. 이상적인 주입 저항의 임피던스(R_{inj})는 삽입되는 피드백 경로의 임피던스에 비해 무시할 수 있을 정도로 작아야 합니다. 피드백 회로의 분압 저항은 통상 수 $k\Omega$ 단위이므로, 이보다 훨씬 작은 $5\Omega \sim 10\Omega$ 범위의 저항을 사용하면 $R_{inj} \ll R_{feedback}$ 조건을 만족시켜 테스트 자체가 루프의 고유한 동작을 변경하는 것을 방지할 수 있습니다.

- 주입 신호의 전압 진폭 선택

주입 신호의 진폭은 측정 정확도에 큰 영향을 미칩니다. 경험적으로 출력 전압의 $1/20 \sim 1/5$ 범위에서 주입 신호의 진폭을 설정하는 것부터 시작해볼 수 있습니다.

- 너무 큰 진폭: 시스템을 비선형(nonlinear) 영역에서 동작하게 만들어 측정 결과에 왜곡을 유발할 수 있습니다.
- 너무 작은 진폭: 특히 저주파 대역에서 신호 대 잡음비(SNR)가 낮아져 외부 노이즈의 영향을 크게 받을 수 있습니다.

<권장사항>

MHO5000 시리즈의 가변 진폭(Var.Amp.) 기능을 적극 활용하십시오. 저주파 대역에서는 상대적으로 높은 진폭을, 고주파 대역에서는 낮은 진폭을 설정하여 전 주파수 대역에서 최적의 측정 조건을 확보할 수 있습니다.

- 주입 신호의 주파수 대역 선택

효율적인 분석을 위해 스위치 주파수 대역을 시스템의 교차 주파수 주변에 집중시키는 것이 중요합니다. 일반적으로 SMPS의 교차 주파수는 스위칭 주파수의 1/20 ~ 1/5 범위 내에 존재합니다. 이 범위를 중심으로 스위치 대역을 설정하면 위상 여유와 이득 여유를 정확하게 관찰할 수 있습니다.

<경험적 설계 목표>

측정 결과를 평가할 때, 아래의 경험적인 설계 목표 값을 기준으로 시스템의 안정성을 판단할 수 있습니다.

- 교차 주파수: 스위칭 주파수의 1/20 ~ 1/5
- 위상 여유 (PM): 45° 이상: 안정성과 응답 속도를 고려하여 45° ~ 80° 추천
- 이득 여유 (GM): 10dB 이상

이러한 절차와 권장 사항을 종합하여, 본 문서의 결론을 맺겠습니다.

6. 결론 및 요약

이번 보데 선도 테스트 가이드는 RIGOL MHO5000 시리즈 오실로스코프를 활용한 스위칭 전원 공급 장치 루프 분석의 전 과정을 체계적으로 다루었습니다. 이 오실로스코프는 내장된 고성능 신호 생성기와 직관적인 보데 선도 분석 기능을 통합하여, 기존에는 복잡한 장비 구성이 필요했던 루프 분석 테스트를 단일 장비로 효율적으로 수행할 수 있게 합니다.

엔지니어는 보데 선도 기능을 통해 위상 여유(PM), 이득 여유(GM), 교차 주파수와 같은 핵심 안정성 지표를 신속하고 직관적으로 분석할 수 있습니다. 이는 설계 최적화 과정을 단순화하여 엔지니어가 더 높은 품질의 제품 개발에 집중할 수 있는 환경을 제공합니다.

주요 사양	MHO5054	MHO5104
아날로그 대역폭	500 MHz	1 GHz
아날로그 채널 수	4채널	4채널
최대 샘플링 속도	4 GSa/s	4 GSa/s
최대 메모리 깊이	500 Mpts	500 Mpts
파형 캡처 속도	최대 1,000,000 wfms/s	최대 1,000,000 wfms/s
디지털 채널	16채널	16채널
신호 발생기 (AFG)	2채널, 50 MHz (옵션)	2채널, 50 MHz (옵션)
보데 선도 (Bode Plot)	지원 (AFG 옵션 필요)	지원 (AFG 옵션 필요)

<참고 문헌>

Rigol Application Notes ANW0100-1220-0033 -

<MHO/DHO5000 Series Digital Oscilloscope Application Guide for Bode Plot Function>