

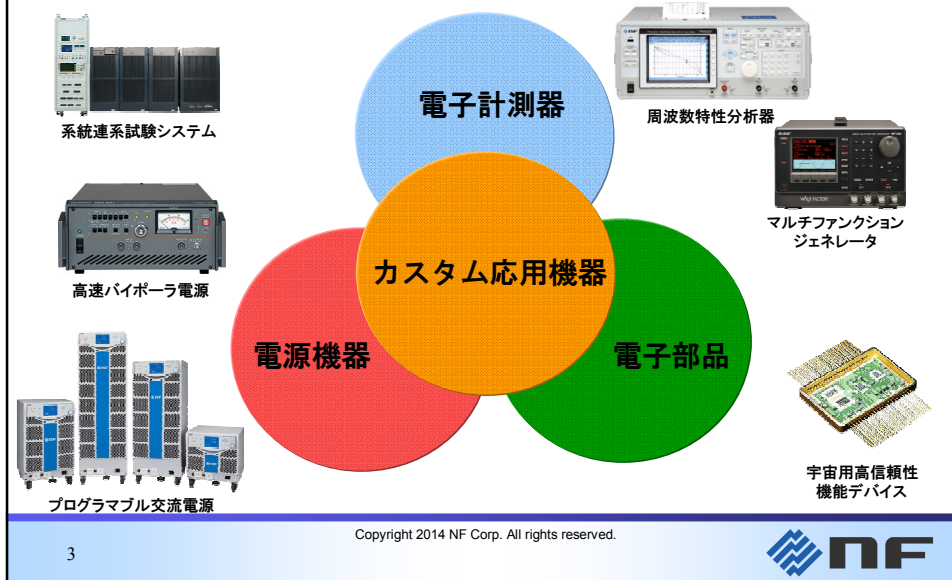


周波数特性分析器(FRA)を使った スイッチング電源の評価

株式会社 エヌエフ回路設計ブロック

株式会社エヌエフ回路設計ブロック について

エヌエフ回路設計ブロックについて

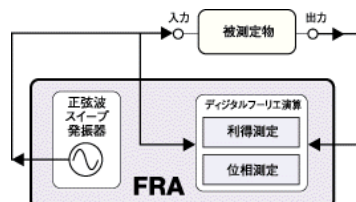


周波数特性分析器 (Frequency Response Analyzer)

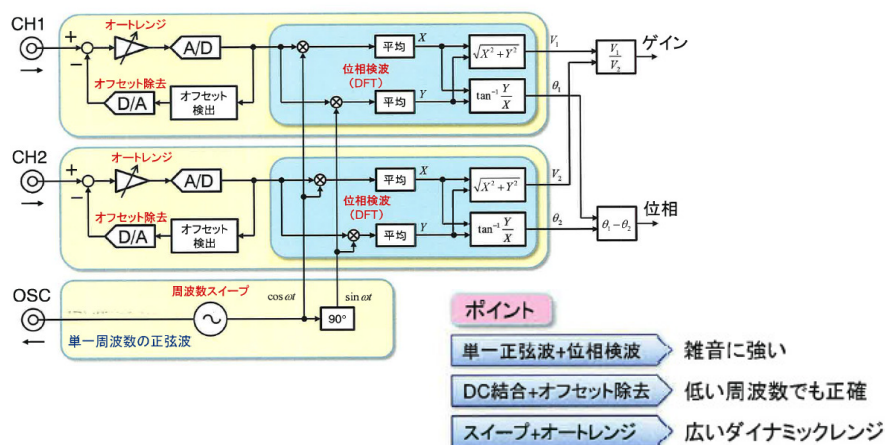


周波数特性分析器とは

正弦波の信号を被測定物に与えて、その周波数応答を求める計測器。
 信号源はFRAにスイープ発振器を内蔵しており、その発振器を基準としてデジタルフーリエ演算により被測定物の利得と位相特性を測定します。
 利得測定や位相測定だけでなく、インピーダンス特性も測定可能です。



周波数特性分析器のしくみ



目次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器 (FRA) について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能

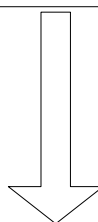
【参考】製品紹介

目 次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器(FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】製品紹介

1:測定の必要性

設計値、シミュレーション結果と、実際のスイッチング電源の特性は異なる場合が多い



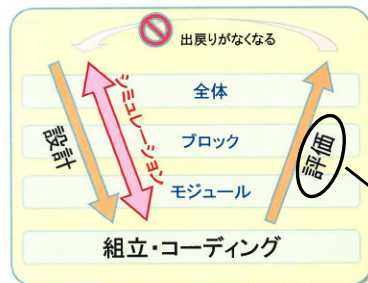
- ・基板化したときのパターンの寄生容量などを考慮しているか？
- ・シミュレーションには含まれない測定環境の違いを考慮しているか？
(シミュレーションは理想状態での動作)
- ・ICのデータシートに記載されている回路例であれば問題ないか？

**実機で測定、特性を測定することにより、
結果的に開発効率の向上、納期短縮につながる。**

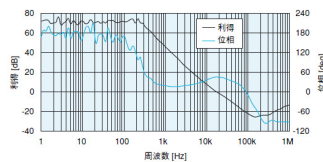
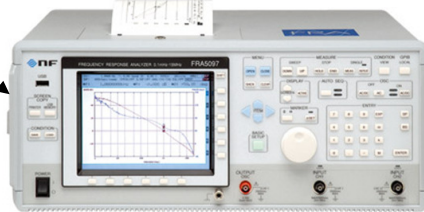
……現状を把握することにより、問題点がある場合抽出しやすい、全体の特性を測定することにより、改善点が見つけやすい、など。

製品開発プロセス

製品開発(V字プロセス)



・評価には実測することが必要



目次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器(FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】製品紹介

2.FRAを使ったスイッチング電源の評価法

FRAで測定可能な特性

負帰還回路の安定度	・ループゲイン特性 ・負荷変動時の応答特性 など
回路や構成部品のインピーダンス特性	・出力インピーダンス特性 ・ロードレギュレーション ・電解コンデンサのインピーダンス特性 など
回路の性能など	・PSRR特性 ・ラインレギュレーション ・リップル除去比 など

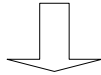
2.FRAを使ったスイッチング電源の評価法

FRAで測定可能な特性

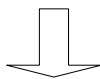
負帰還回路の安定度	・ループゲイン特性 ・負荷変動時の応答特性 など
回路や構成部品のインピーダンス特性	・出力インピーダンス特性 ・ロードレギュレーション ・電解コンデンサのインピーダンス特性 など
回路の性能など	・PSRR特性 ・ラインレギュレーション ・リップル除去比 など

ループゲイン特性測定

負帰還ループの安定度を評価したい



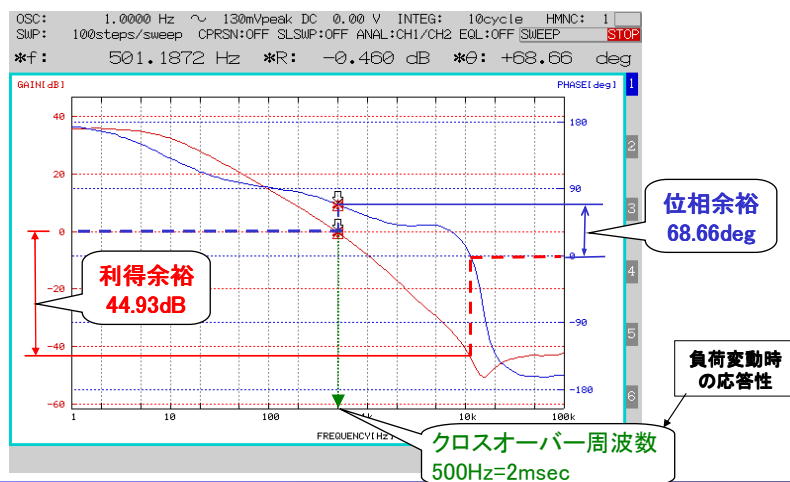
位相余裕、利得余裕、クロスオーバー周波数を求める
必要がある。そのためには……



FRAでループゲイン特性を測定

ループゲイン特性測定

ループゲイン特性測定例



ループゲイン特性測定: 負帰還回路

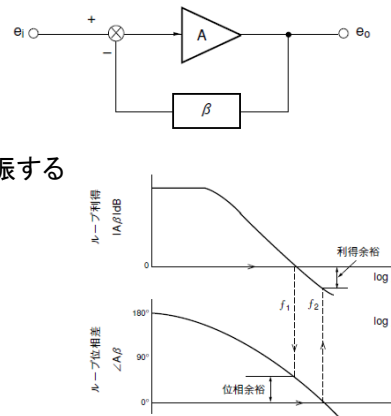
負帰還回路について

負帰還回路の利得は $\frac{e_o}{e_i} = \frac{A}{1 + A\beta}$

ループ利得 $A\beta$ が -1 ($=0\text{dB}$) で位相差が 180deg になるとき、負帰還が正帰還となり発振する
つまり

「負帰還とは $A\beta$ のクロスオーバー周波数での位相差が 180deg より小さいこと」

$\Rightarrow A\beta$ の位相差が 180deg よりどれくらい下の値かを測定すれば、ループが発振するかの目安になる。(位相余裕)

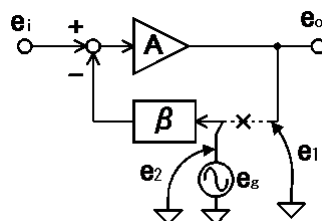


ループゲイン測定はFRAでループ利得 $A\beta$ を測定

ループゲイン特性測定: 測定方法

古典的な測定方法:

負帰還ループの1箇所を切って入出力電圧を直接測定する



POINT

- ・測定方法が簡単
- ・通常 A (アンプ利得) が DC 付近で非常に大きい
 $\Rightarrow$ ループが飽和しやすい

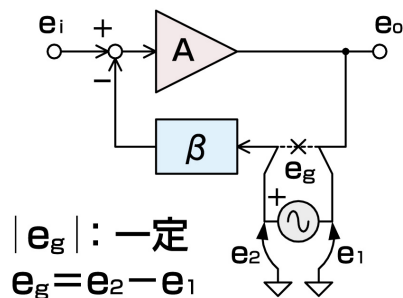
ループゲイン特性測定:計測器について

ループゲイン測定のための計測器に必要な条件

- (1) 低周波での大きなゲイン
⇒ 測定周波数範囲内で測定レベルが100dB以上変化
⇒ **大きなダイナミックレンジが必要**
- (2) ループを切ると系が飽和する
⇒ **実動状態での測定が必要**
- (3) 広い周波数範囲(数Hz以下～MHz)が必要
⇒ **ログスイープで観測**

ループゲイン特性測定:実際の原理

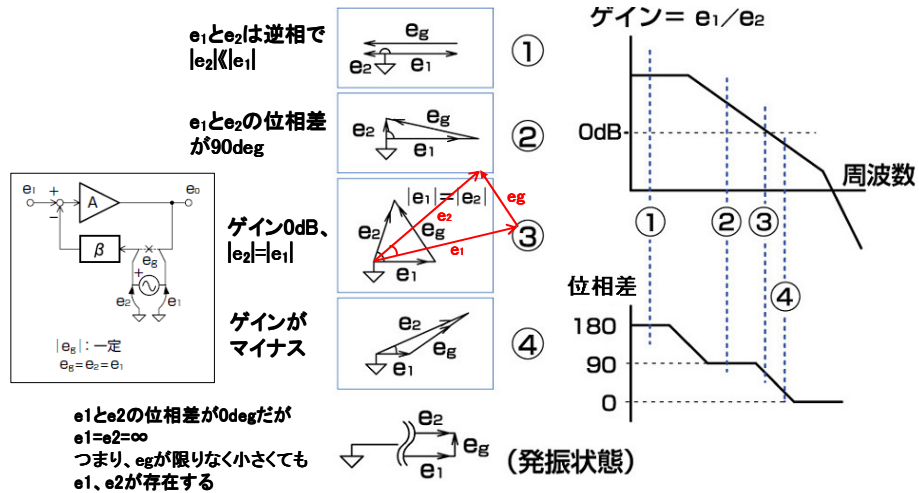
ループゲイン測定の実際の原理



POINT

実動状態で測定できる

ループゲイン特性測定: ボード線図、ベクトル図



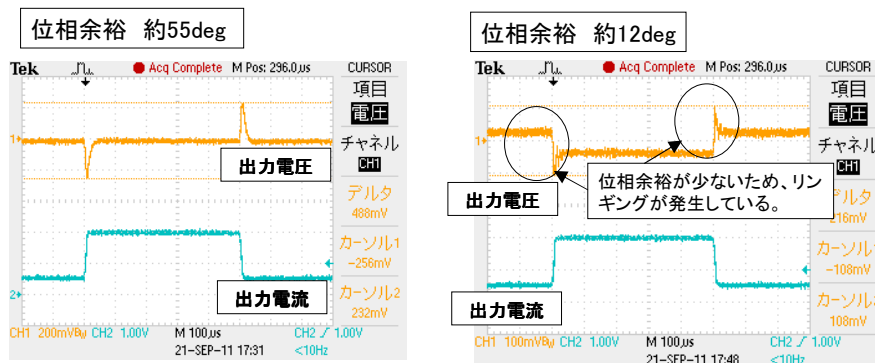
19

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



ループゲイン特性測定: 位相余裕

位相余裕による負荷応答波形の違い



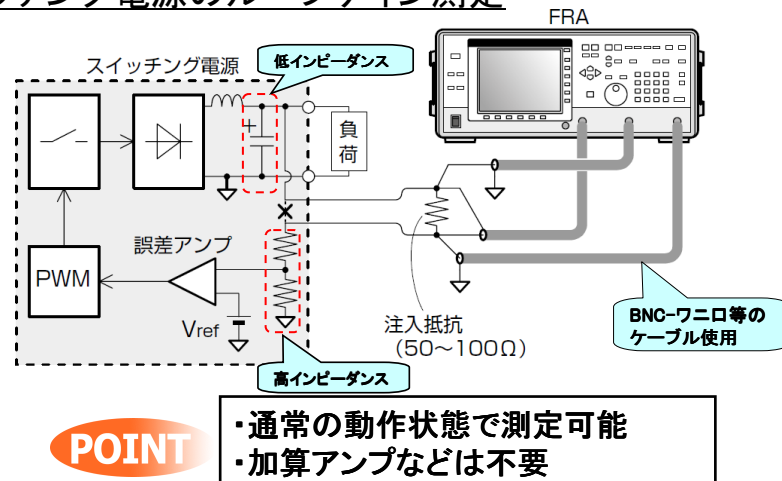
20

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



ループゲイン特性測定

スイッチング電源のループゲイン測定



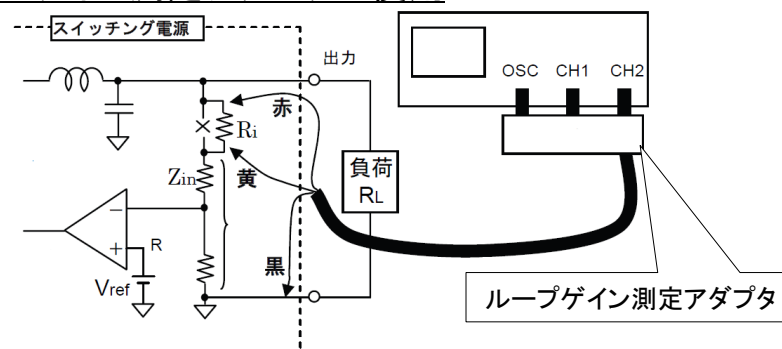
21

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



ループゲイン特性測定: 測定アダプタ

ループゲイン測定アダプタの使用

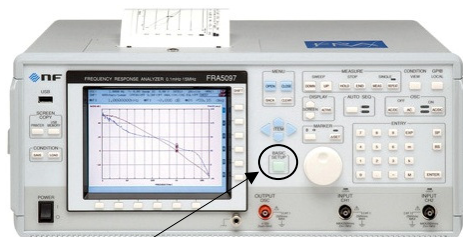


22

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



ループゲイン特性測定:FRAの設定



FRAの基本設定(Basic Setupボタン)

1. スweep周波数範囲の上限/下限の周波数を設定
2. 発振器出力レベルを設定⇒出力ON
3. 測定開始(Sweep Up または Down)

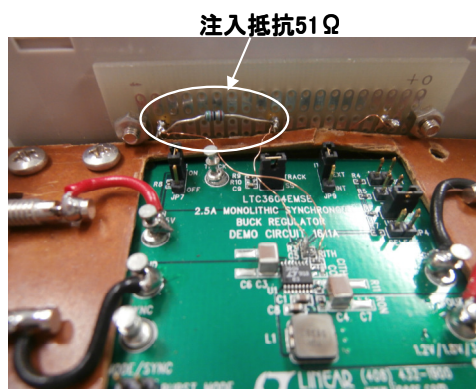
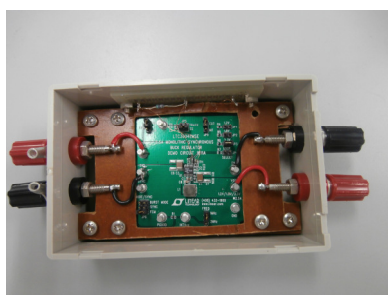
POINT

以下の設定は必要ありません

- ・周波数レンジ設定
- ・窓関数設定
- ・入力レンジ設定
- ・入力結合設定 (常にDC)

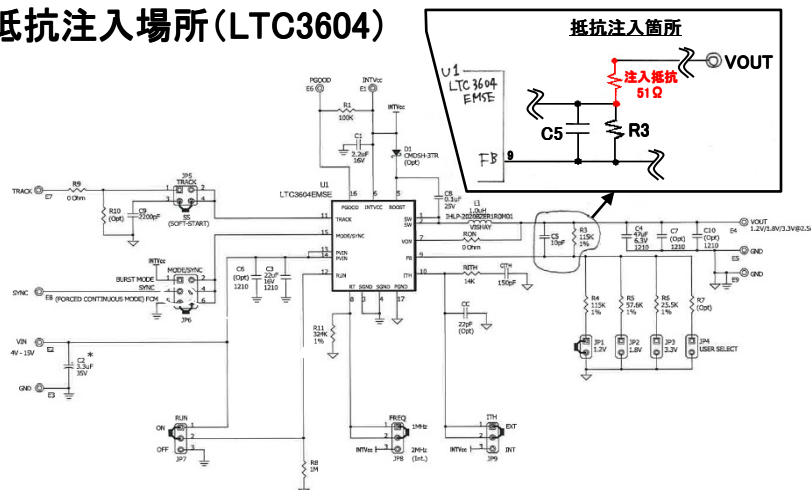
ループゲイン特性測定:デモ用治具

デモ用治具(LTC3604)



ループゲイン特性測定: デモ用治具

抵抗注入場所(LTC3604)



25

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



2.FRAを使ったスイッチング電源の評価法

FRAで測定可能な特性

負帰還回路の安定度	・ループゲイン特性 ・負荷変動時の応答特性 など
回路や構成部品のインピーダンス特性	・出力インピーダンス特性 ・ロードレギュレーション ・電解コンデンサのインピーダンス特性 など
回路の性能など	・PSRR特性 ・ラインレギュレーション ・リップル除去比 など

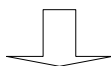
26

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



出力インピーダンス特性測定

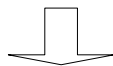
スイッチング電源は出力インピーダンスが非常に低いが、出力インピーダンスが大きすぎれば負荷接続時に電圧が低下する



- ・CPUやFPGA搭載基板で高速でアクセスするような回路
- ・モータなどの周波数が変化するような負荷

など状態が変化する負荷を接続した場合でも安定して電圧が出力できるかを確認したい。

そのためには・・・



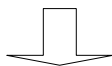
FRAで出力インピーダンス特性を測定

出力インピーダンス特性測定

ロードレギュレーション	: DC
出力インピーダンス	: 任意周波数

=>ロードレギュレーションは直流での出力インピーダンスなので
直流的な負荷(抵抗)にのみ有効

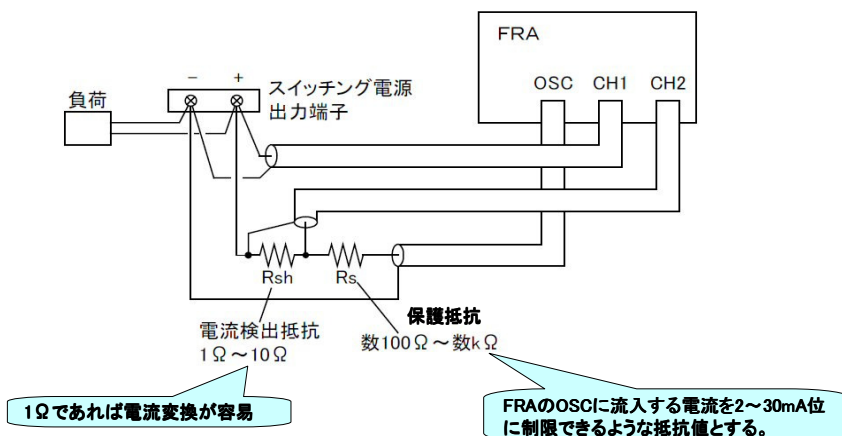
=>負荷の周波数が変動しインピーダンスが変化する場合は電源
の挙動を把握しておきたい。



任意の周波数での
出力インピーダンスを測定すること

出力インピーダンス特性測定:測定ブロック図

出力インピーダンス測定 ブロック図



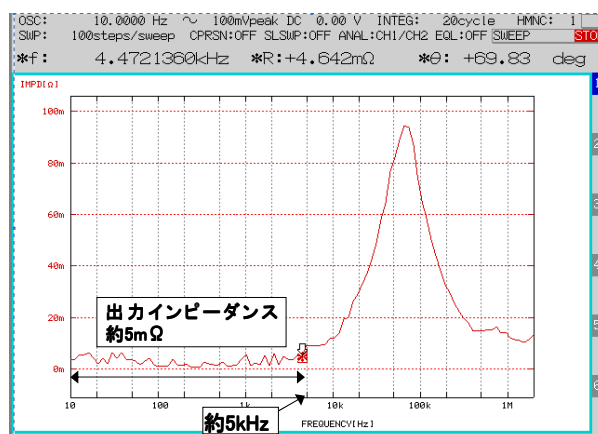
29

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



出力インピーダンス特性測定

出力インピーダンス特性測定例



30

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



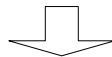
2.FRAを使ったスイッチング電源の評価法

FRAで測定可能な特性

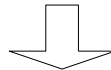
負帰還回路の安定度	・ループゲイン特性 ・負荷変動時の応答特性 など
回路や構成部品のインピーダンス特性	・出力インピーダンス特性 ・ロードレギュレーション ・電解コンデンサのインピーダンス特性 など
回路の性能など	・PSRR特性 ・ラインレギュレーション ・リップル除去比 など

PSRR特性測定

スイッチング電源は安定して電圧を出力する必要がある



周辺機器の影響や、ノイズなどに影響で電源入力にリップルが乗ってしまう場合や入力電圧が変動してしまう場合でも、安定して出力が得られる指標を得たい。そのためには……



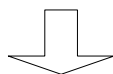
PSRR(電源電圧変動除去比)特性を測定

PSRR＝電源電圧変動除去比 (Power Supply Rejection Ratio)
電源電圧にリップルがある場合、それを取り除く能力のこと

PSRR特性測定

リップル除去比: 50Hz or 60Hz(商用電源周波数)
ラインレギュレーション: DC
PSRR: 任意周波数

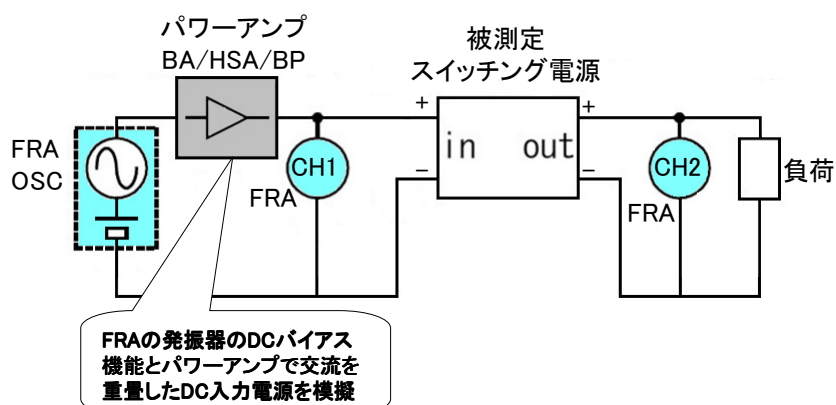
⇒ラインレギュレーションは直流的(DC)に変動に対する値
⇒電源電圧の変動によって生じた出力電圧の過渡応答も考慮したい。



任意の周波数での
PSRR(電源電圧変動除去比)特性を測定すること

PSRR特性測定

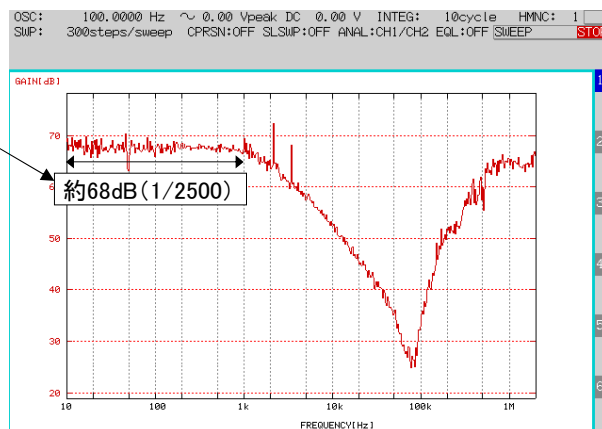
スイッチング電源のPSRR特性測定接続例



PSRR特性測定

PSRR特性測定例

電源入力に乗った
リップルのレベルを出力で
1/2500にできる



目 次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器(FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】製品紹介

FRAについて: 周波数特性を測る測定器

1. 発振器 + 交流電圧計

- ・ノイズ・歪みを含めて測定してしまう。
- ・測定が面倒で時間がかかる。
- ・位相差が測定できない・確度が悪い

2. ネットワークアナライザ

- ・低周波(～100kHz位)の測定が出来ない(時間がかかる)
- ・測定信号レベルが小さい

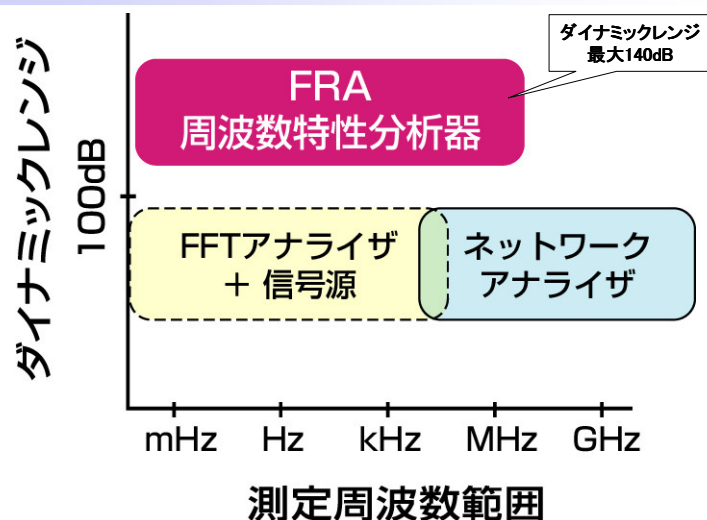
3. FFTアナライザ + 信号源

- ・広範囲の周波数での測定は不向き
- ・ダイナミックレンジが狭い(～96dB)
- ・周波数分解の制限(サンプリング速度・メモリ長の制約)

4. FRA(周波数特性分析器)

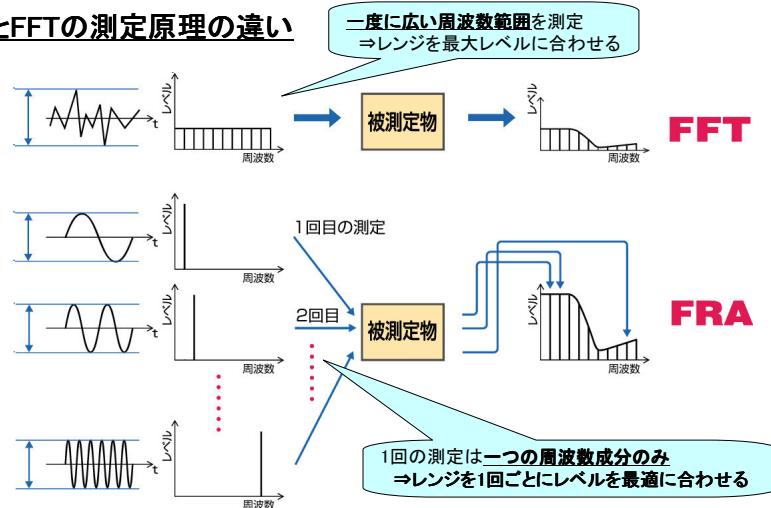
- ・ダイナミックレンジが大きい
- ・周波数分解能の制限が無い
- ・周波数レンジが無い

FRAについて: 測定周波数範囲



FRAについて:測定原理

FRAとFFTの測定原理の違い



目 次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器 (FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】 製品紹介

よくあるご質問

ループゲイン測定のごよくあるご質問

1. 注入抵抗値は？

50 Ω ~ 100 Ω 程度 (※回路 (出力電圧値) により適宜変更してください)

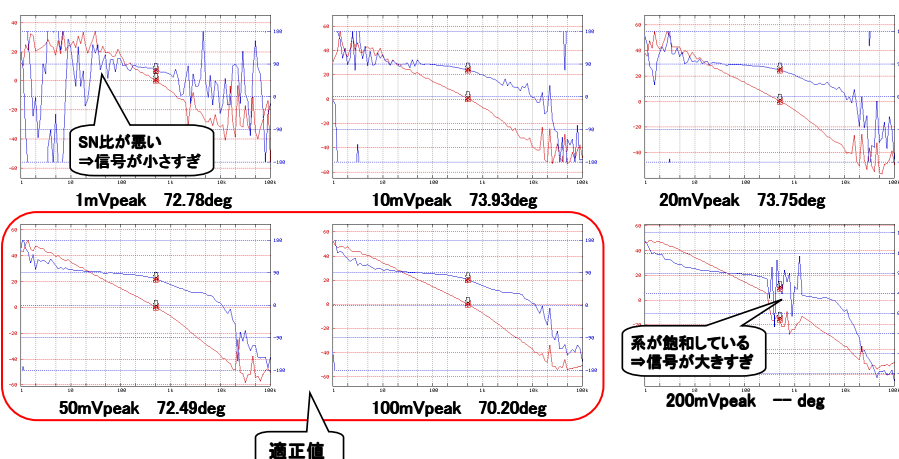
抵抗値が大きすぎると、スイッチング電源出力電圧が大きくなり、
小さすぎると、注入信号レベルが低下して測定SN比が悪化します。

2. FRAの信号振幅レベルは？

出力電圧の1/100 ~ 1/50程度 (例) 5V出力の場合は50 ~ 100mVpeak
動作中の電源に信号を注入し反応を見る、という測定の性質上、
注入レベルは小さい程良いが、小さすぎればノイズに埋もれてしまい測定
自体ができなくなります

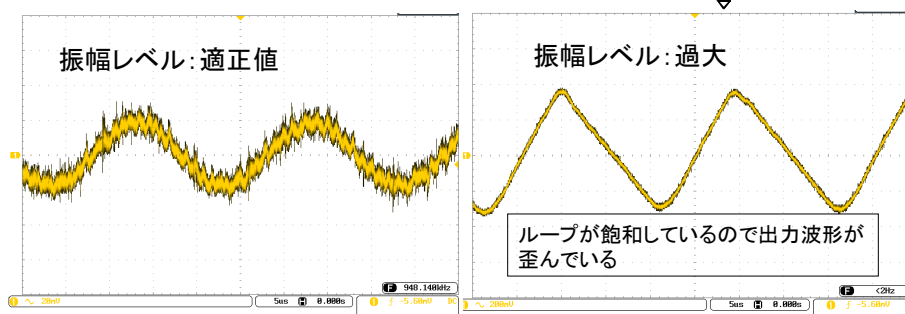
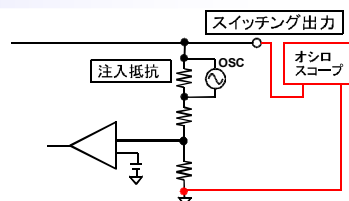
よくあるご質問

(参考1) FRAの信号振幅レベルによる測定結果の違い (出力電圧5V電源)



よくあるご質問

(参考2)FRAの信号振幅レベルによる
出力波形の違い



よくあるご質問

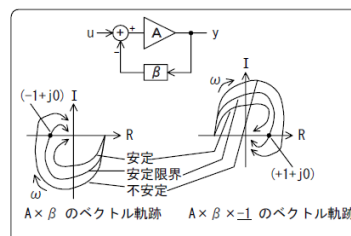
3.ボード線図で判定が難しい場合

- ・電源に発振などの異常は無いが位相余裕、利得余裕がマイナスに測定される場合
- ・Gain=0dB、位相=0degになる周波数が複数ある場合



ボード線図で判定が難しい場合は

ナイキスト線図による安定判別法
で評価を行ってください。



測定のコツ

ループゲイン測定のコツ

- スイープ方向は、通常Down Sweepが便利
配線間違い/異常動作等が迅速に発見できます。
- OSC振幅レベルを変えて測定
被測定回路の非線形性(歪等)の影響が分かります。
- スイープ方向がUp/Downで異なる特性を示す
測定条件が不適(信号レベル過大)だったり、測定
対象に何らかの異常(発振寸前等)が疑われます。

目 次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器(FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】製品紹介

さらに高度な測定: インピーダンス特性測定

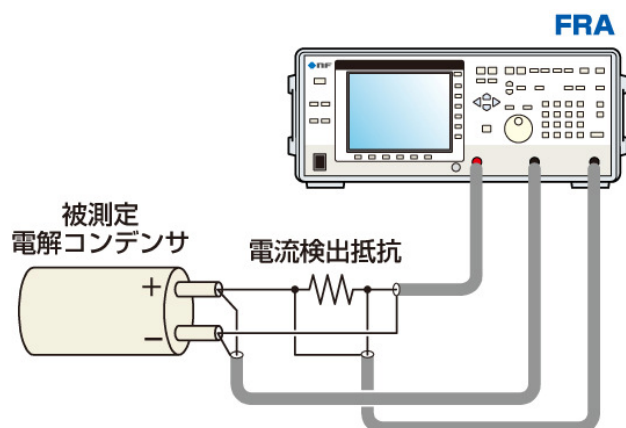
インピーダンス測定のいろいろ

LCRメータとFRAの比較

	LCRメータ	FRA
測定電圧/電流	小さい ($\sim 5\text{V}$ 程度)	自由 ($\sim 250\text{Vrms}$ 、パワーアンプによる増幅可能)
測定精度	良い	LCRメータよりは劣る
測定回路	固定 (テストフィクスチャ等)	自由

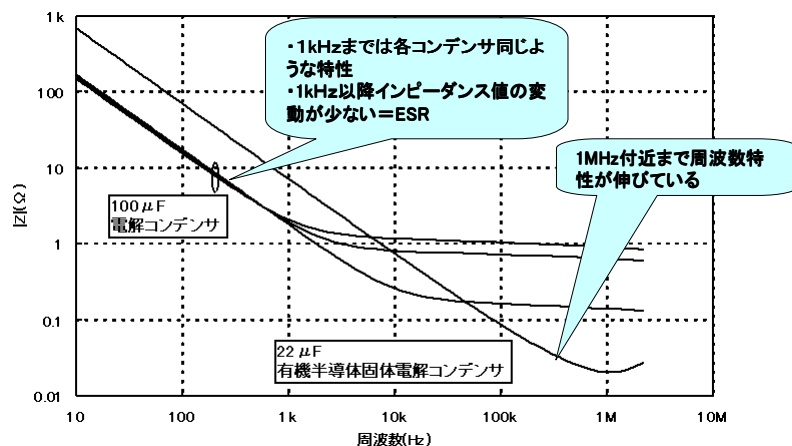
さらに高度な測定: インピーダンス特性測定

電解コンデンサのインピーダンス測定例



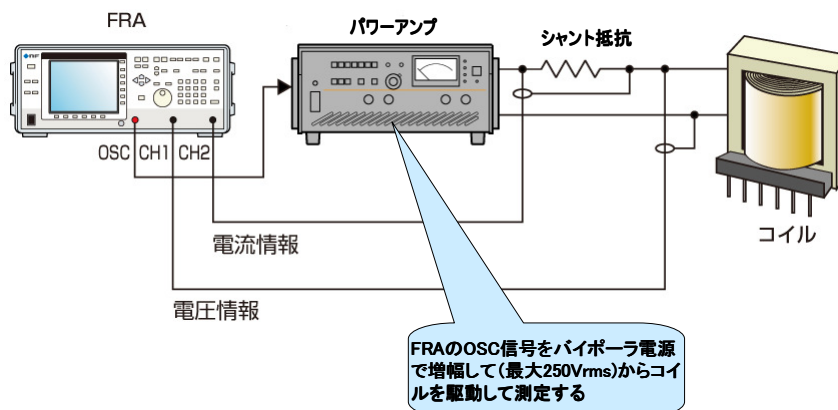
さらに高度な測定: インピーダンス特性測定

各社の電解コンデンサのインピーダンス特性の測定例



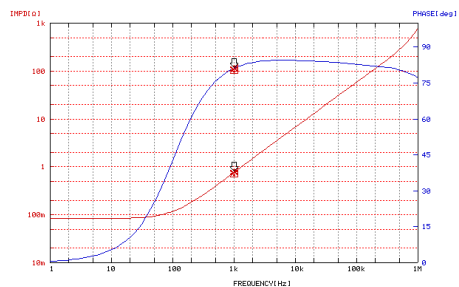
さらに高度な測定: 大電流でコイルを測定

測定信号を外部アンプで増幅し大電流でコイルを測定する例

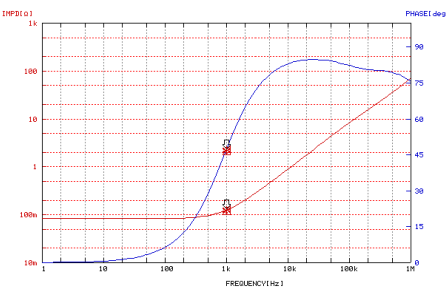


さらに高度な測定：大電流でコイルを測定

測定信号を外部アンプで増幅し、DCバイアスをかけて
大電流でコイルのインピーダンスを測定した場合の測定結果例



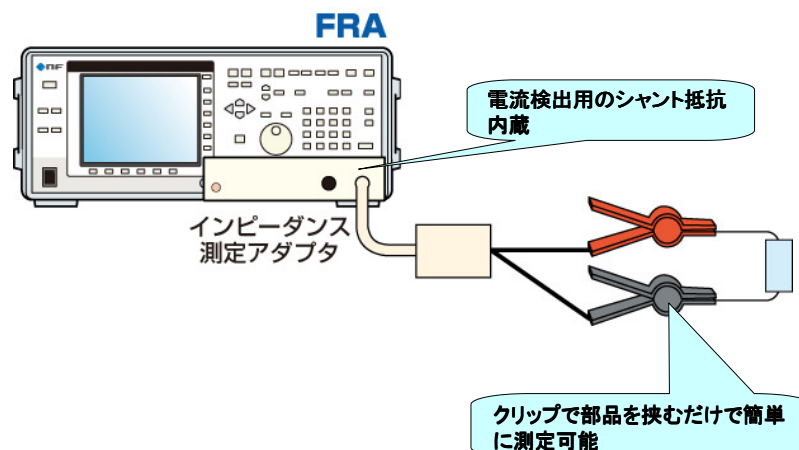
直流バイアスなし



直流バイアスあり

測定結果に違いが現れていることがわかる(特に100Hz以降)

さらに高度な測定：インピーダンス測定アダプタ



目 次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器(FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】 製品紹介

5.FRAの特長的な機能

1. オートレンジ
2. 入力結合
3. 積分処理
4. 測定開始遅延
5. 振幅圧縮機能
6. SLOW SWEEP(周波数軸低速高密度掃引)
7. 入出力アイソレーション

オートレンジ機能

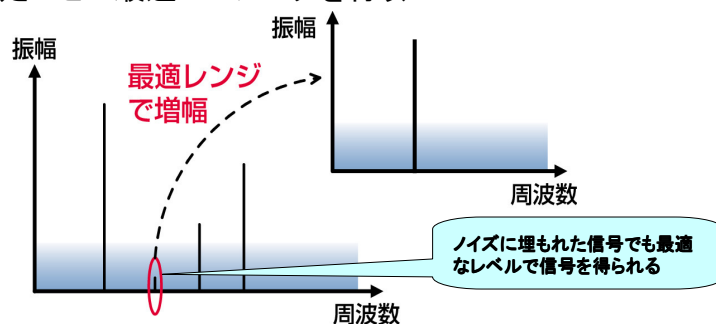
オートレンジ機能

FFT: 入力レンジ固定

(測定周波数範囲の最大レベルにレンジを合わせる)

FRA: オートレンジング

(測定ごとに最適レンジングを行う)



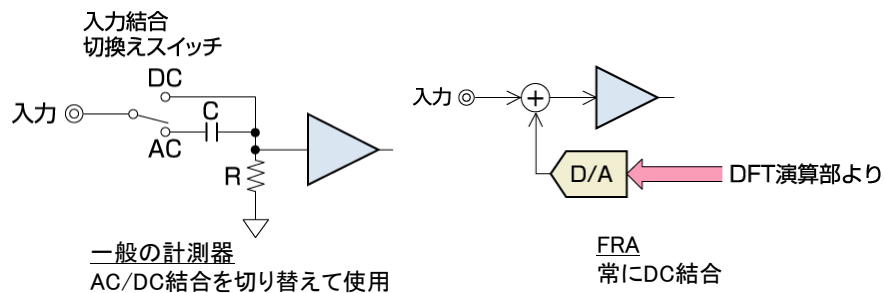
55

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



入力結合

入力結合: FRAは常にDC結合



- ・DC除去が瞬時に行われる
(DCオフセットキャンセル用のD/Aコンバータ)
- ・過渡応答が無く、超低周波でも振幅、位相の乱れが無い
(AC結合のC,Rが無いから)

56

Copyright 2014 NF Corp. All rights reserved.



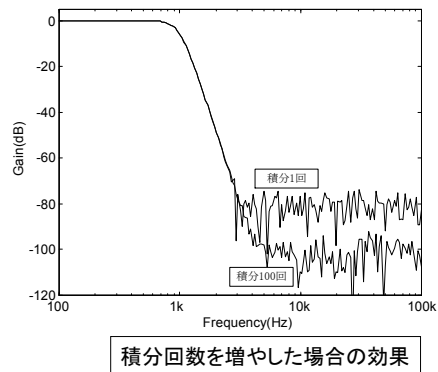
積分処理

積分処理＝平均化に相当する機能

同等な機能の呼び方

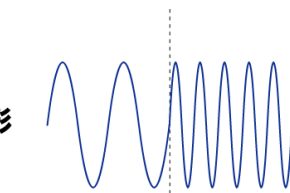
- ・ネットワークアナライザ
RBW(分解能帯域)
- ・FFTアナライザ
平均化(アベレージ)
- ・FRA
積分(Integration)

積分回数を増やすことにより、測定値のノイズの影響を減らすことができる



測定開始遅延

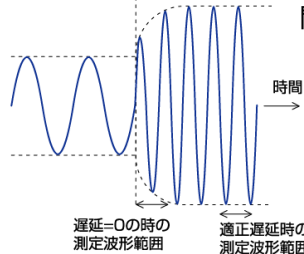
OSC出力波形



OSC周波数= f_1

f_2

被測定物応答波形

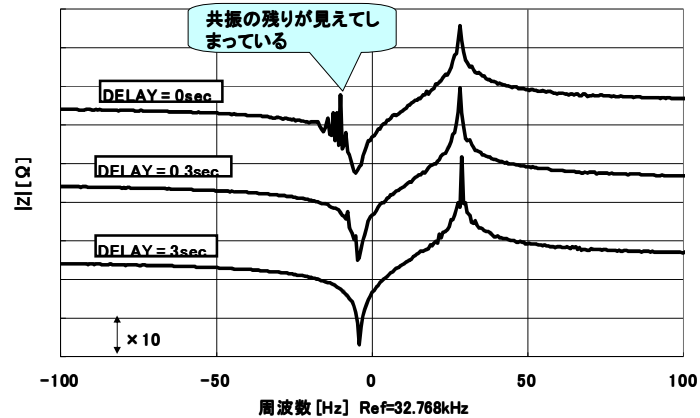


機械系や鋭い共振を示す試料を測定する場合は過渡応答が見える

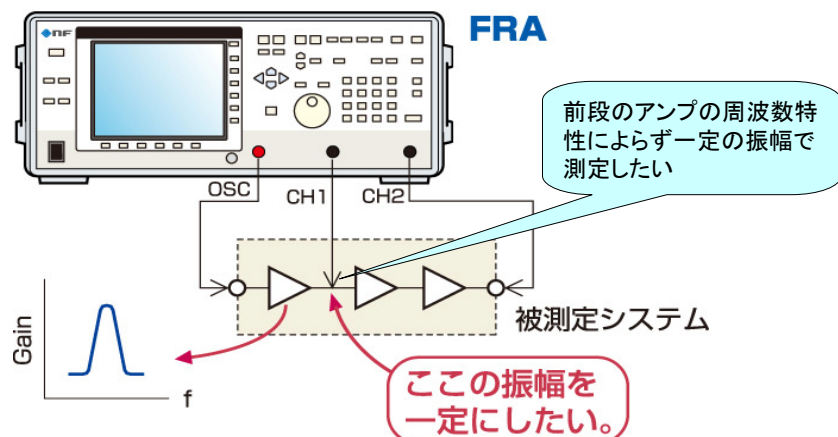
⇒落ち着くまで待ってから測定開始することができる機能

測定開始遅延

時計用水晶振動子のインピーダンス特性
(DOWNSWEEPで測定)

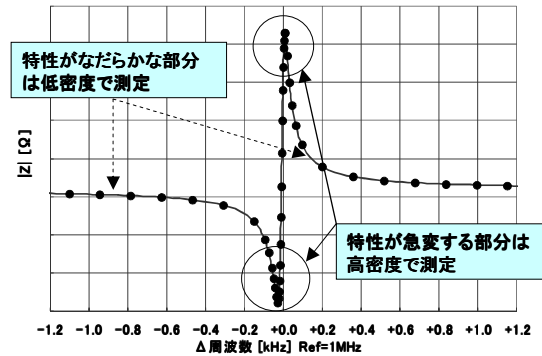


振幅圧縮機能



SLOW SWEEP (周波数軸低速高密度掃引)

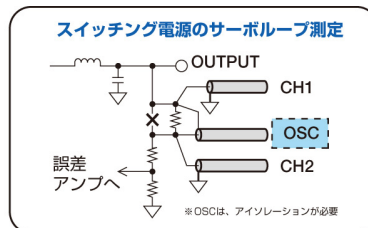
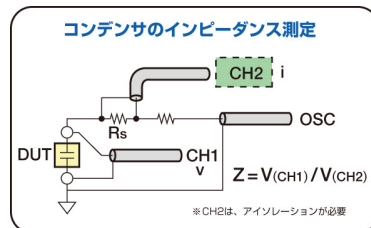
SLOW SWEEP (周波数軸低速高密度掃引)



特性が急変する場合、急変部分だけを自動的に高密度に測定

入出力アイソレーション

FRAは各端子 (OSC、CH1、CH2) が分析入力、発振器、ケース (筐体) の各々からアイソレーションされている



- ・回路に直列に信号源を注入したい場合 (スイッチング電源のサーボループ特性測定)
- ・測定点の基準電位がグラウンドの電位と異なる場合 (コンデンサのインピーダンス測定)

FRA5087/FRA5097の仕様

絶縁耐圧 (対筐体、分析入力、OSC) : 250Vrms
最大測定電圧 : 250Vrms

まとめ:FRAが得意な測定

●大きなノイズ, 直流が重畳されている場合の測定

スイッチング電源のループゲイン特性、出力インピーダンス特性
電池の内部インピーダンスなど

⇒各端子が筐体からアイソレーションされている

●大電流/大電圧でのインピーダンス測定

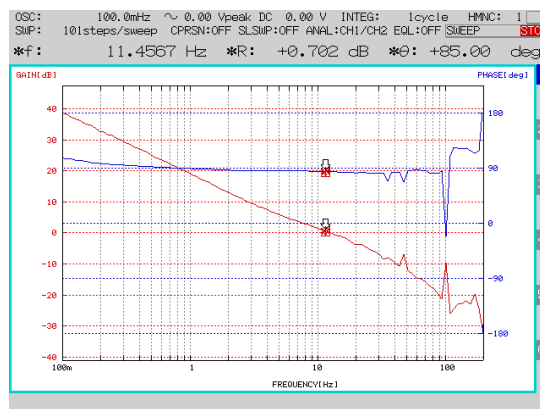
パワエレ用受動素子の測定等

⇒最大測定電圧250Vrmsなので、バイポーラ電源とFRAを
組み合わせ、信号を増幅(=大電流/大電圧)して測定が可能

(参考データ)その他の電源

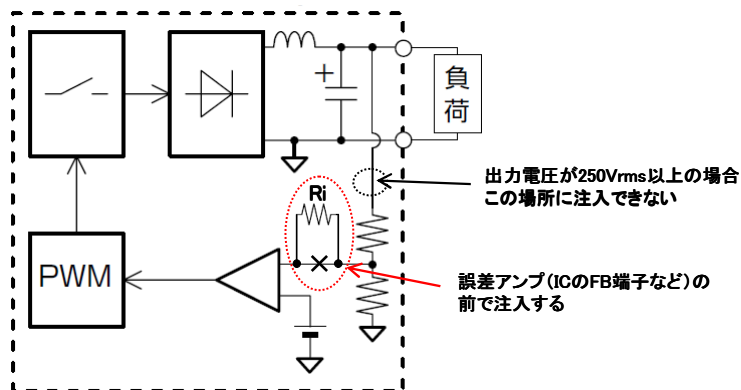
PFC回路電源(出力390V)測定例

位相余裕⇒85deg



(参考データ) その他の電源

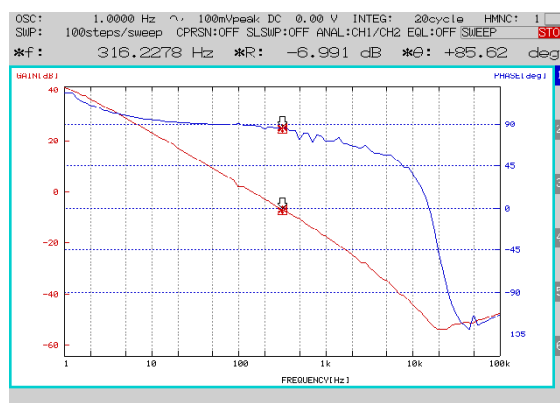
スイッチング電源の出力電圧が250Vrms以上の場合の測定例



(参考データ) その他の電源

デジタル制御電源 ループゲイン特性測定例

位相余裕⇒85deg



目 次

1. 測定の必要性
2. FRAを使ったスイッチング電源の評価方法
3. 周波数特性分析器(FRA)について
4. よくあるご質問、測定のコツなど
5. さらに高度な測定
6. FRAの特長的な機能
7. 【参考】製品紹介

製品紹介:FRA5087/FRA5097の概要

主な仕様

測定周波数範囲	FRA5087:0.1mHz～10MHz FRA5097:0.1mHz～15MHz
利得精度	±0.05dB、位相精度±0.3°
ダイナミックレンジ	140dB以上
アイソレーション電圧	250Vrms
オートレンジング機能	入力信号に追従して入力レンジが切り換わる
グラフ	ボード線図、ナイキスト線図、 ニコルス線図、コール-コールプロット
その他	感熱プリンタ内蔵

製品紹介:FRA5087/FRA5097

周波数特性を高精度に測定するFRA。

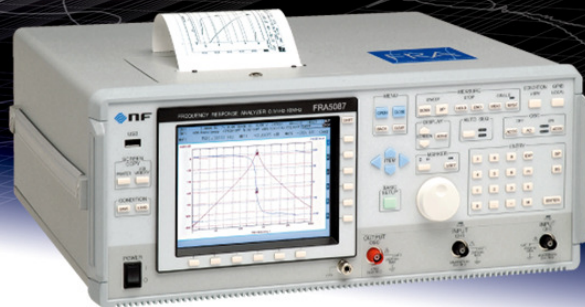
周波数特性分析器

FREQUENCY RESPONSE ANALYZER

FRA5087 [10MHzタイプ]

FRA5097 [15MHzタイプ]

従来モデル
は20kHzから
UP!



インピーダンス/ゲインフェーズアナライザ ZGA5920



FRA(周波数特性分析器)の基本をそのままに、解析力・操作性を向上、測定器のジャンルを超えた新しいツール。

--各種電子材料・電子部品・電子回路の特性を評価する総合解析装置

- ・豊富な測定スイープパラメタ(周波数、AC振幅、DCバイアス、時間)と高密度周波数 スイープ
- ・測定条件と測定結果のデータ管理機能
- ・繰り返し測定の自動化
- ・外部機器との連携(コントロールI/O)
- ・データロギング用アナログ信号入力装備
- ・ユーザシステムとの連携を可能にするソフトウェア開発者向けキット(SDK)を提供
- ・マルチランゲージ対応(日本語、英語)

まとめ

ご清聴ありがとうございました。