



製品設計者に聞く

# 電子負荷装置広帯域化のブレークスルー

株式会社 計測技術研究所

計測技術研究所は、電源の検査装置からはじまり、多くの検査装置、電源の開発・製品化を進めてきた技術型企业である。同社の技術力をよく示す電子負荷装置について設計者の方に伺った。



## 電子負荷装置の開発の歴史

弊社は、1973年に設立されたのですが、当初は電源関係の特注品を受託し製作していました。当時は、スイッチング電源がようやく製品化された頃ですから、まだまだ特注電源のご注文が中心でした。そのうちに特注品として、1980年に電源の自動検査装置K-230型を製造することとなりました。当時はまだ電子負荷装置という名称ではなかったのですが、機能的には現在の製品につながるものです。当社の電子負荷装置の新規性は、デジタル設定、GB-IB制御及びリップルノイズをデジタルで測定できることにありました。しかし、発売当初、十分にメリットをご理解いただけず、1年ぐらい売れない状態が続きました。オシロスコープで測りとったリップル波形と相関があることを1件1件説明しながら、お客様を増やしていきました。最近では、3.3Vや1.2VといったPC用電源などで、低電圧・大電流対応へのご要望が増加して、製品化をいたしました。それがLoad Stationシリーズです。

Load Stationシリーズは、電源や電源デバイスの開発から製造検査といった用途に適するように、(1)ピーク電力と(2)低電圧動作により動作範囲を飛躍的に広げることが出来ました。

2003年に、ゼロボルト入力電子負荷装置(ELZ-303)及び、低電圧動作する電子負荷装置(ELL-303)を開発いたしました。

また、2004年には、超高速負荷応答の電子負荷(ELS-304)を開発いたしました。各技術に関しての概要は以下の通りです。

### (1) ピーク電力対応技術

Extreme Power技術(特許出願中)により通電時間と平均電力をダイナミックに管理し定格電力(連続)を超えた電力で動作します。電源の負荷変動試験、過電流試験など、短時間のピーク電力対応が必要な場合に有効です。

### (2) 低電圧動作技術

突入電流を流さない回路方式を採用したことから、突入電流遮断回路による最小動作電圧という概念がありません。端子間にわずかな電位差があれば一定量の負荷電流を流すことが可能です。

### (3) 高速応答技術

低電圧動作電子負荷を製品化するにあたって、それら2機能以外に、高速化の機能も付加しようと考えました。そこで装置内部の寄生インピーダンスを低減し50A/ $\mu$ Sという高いスルーレートを開発したところ、PC関連業界のお客様にご好評いただきました。「幸運なる偶然」というのでしょうか。

更に速い動作速度のご要求をいただき、最終的にELS-304では、200A/ $\mu$ Sという高スルーレートを実現して、今や当社製品の大きなセールスポイントの一つとなっています。

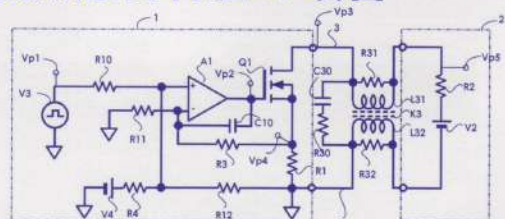
## 技術資料

### 電子負荷装置の負荷電流周波数応答特性の改善

弊社の電子負荷装置における中核技術のうち、高速応答技術について紹介する。ここでは、弊社最初の超高速負荷応答対応製品ELS-304における応答特性の改善について解説する。

#### 従来課題

従来の技術による回路構成を図1に示す。



<図1>従来の技術による回路構成図

図1における接続ケーブル3の等価インダクタンスLによって、動的負荷電流の増加時には式1に示すようにスルーレートをSとすると、接続ケーブルによる電圧降下eは式2に示す関係式となり、この電圧降下eが被試験電源の直流出力電圧に近くなったときに、負荷トランジスタQ1のドレイン・ソース間電圧が飽和し、式3に示す関係式からおおよそ式4のスルーレートとなる。

$$S = \frac{di}{dt} \quad \dots \text{式1}$$

$$e = L \times S = L \times \frac{di}{dt} \quad \dots \text{式2}$$

$$L \times \frac{di}{dt} = E \quad \dots \text{式3}$$

$$S = \frac{di}{dt} = \frac{E}{L} \quad \dots \text{式4}$$

急峻な負荷電流変動や広範囲な周波数応答特性を実現するためには、大きく分けて以下の4点が必要である。

①電子負荷装置と被試験電源接続ケーブルのインダクタンスの影響軽減

被試験電源の出力電圧をE、負荷トランジスタQ1のドレイン・ソース間電圧の飽和時間をTとすると式5で表され、この電圧飽和時間中には、負荷電流は本来の電流値あるいは電流波形ではなくなる不都合が生じることになり、この影響を防止するために接続ケーブルを短くして接続ケーブルによる等価インダクタンスLを減少させ、目的とするスルーレートの高い負荷電流波形を得ることが簡便な方法であり従来行われてきた。

$$T = L \times \frac{E}{I} \quad \dots \text{式5}$$

②電圧飽和状態からの回復時間遅延によるオーバーシュート特性の改善

従来技術では、電圧飽和からの回復過程において、設定電流値を超えるオーバーシュートを防ぐことがきわめて困難であり、電圧飽和現象が起きない範囲の緩やかなスルーレートの負荷設定におさえる等の便宜的な手段をとらなければならなかった。

③急峻な負荷電流変動時における電子負荷装置制御ループの応答特性の改善

高速応答を求めて制御ループの周波数帯域を広くすると、接続ケーブルのインダクタンスLの増大とともにループ特性の振幅余裕、位相余裕が減少して、過渡特性にオーバーシュートが発生し、ひいては電子負荷が連続発振を起こすこともある。従来技術では、接続ケーブルのインダクタンスが、ある程度大きくなっても発振に至らないように、周波数フィルタによって周波数帯域を下げ、応答速度を大幅に犠牲にしなければならなかった。

④スレッシュホールド電圧による動作開始時間遅延特性の改善

従来の装置では、電子負荷の端子電圧を検出し、この検出

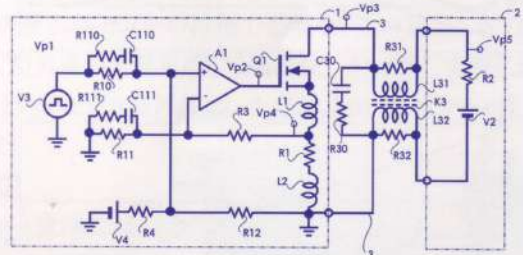
値が一定のスレッシュホールド電圧以下の時には被試験電源が電源オフであると見なして、スレッシュホールド電圧を超えた時にはじめて負荷電流制御ループを動作させる等の手段をとっている。この回路を付加することにより被試験電源の動作開始からの時間遅延が発生することと、スレッシュホールド電圧以下の電圧では常時負荷電流が遮断してしまうという弊害も発生する。

解決策

本装置では、以下の2点の解決策を考慮した。

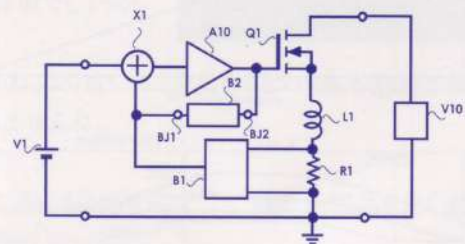
1) 負荷電流制御用トランジスタQ1のソースに直列にインダクタンスL1を付与することにより、電子負荷制御ループの周波数応答特性および被試験電源起動時の電子負荷過渡応答特性を改善する。

2) 制御回路のトランジスタ駆動用演算増幅器の入力・出力間に非直線素子による回路手段をもうけることにより、広範な負荷電流範囲において良好な負荷電流制御特性を得る。



<図2> 1)を反映した回路構成

回路としては、以下の図に示す構成とした。



<図3> 2)を反映した回路構成ブロック図

本実施例については、シミュレーションにより検証をしたので、以下にその結果を示す。

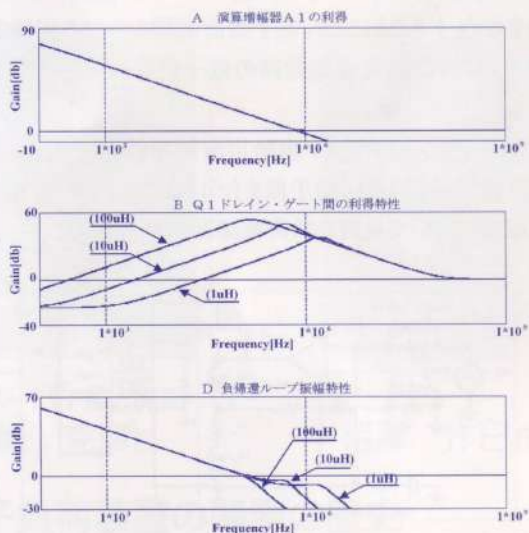
結果

1-a) 周波数特性

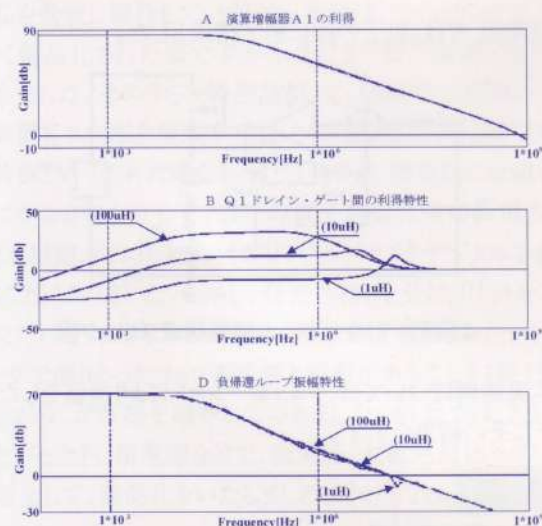
図1の従来の回路図による従来技術の各部の周波数特性と一巡する帰還ループ特性を図4に示した。接続ケーブル3のインダクタンスL31, L32によって振幅余裕、位相余裕ともに少なく、閉ループ周波数特性において高いピークの周波数特性が予想される。接続ケーブルのインダクタンスとFET Q1のドレイン・ソース間静電容量による並列共振で電圧増幅度の高くなる周波数において、帰還ループゲインも大きく影響を受け、系が不安定になったり連続発振を引き起こすこともある。これを避けるために、帰還コンデンサC10を大きくし、演算増幅器A1の出力電圧までの周波数特性は図4-Aに示す如く、かなり周波数帯域を落と

すことになる。

図2に示す回路についても、同様にシミュレーションを行い、その結果は図6のようになっている。演算増幅器A1の出力までの電圧増幅度の周波数特性は図5-Aに示すように演算増幅器A1のほぼ無帰還増幅度に対応した広帯域かつ高い増幅度となっている。FET Q1のソースにインダクタンスL1を挿入してあるために、このインピーダンスによる電流帰還がかかり図5-Bに示すように中間の周波数帯で急峻なピークを持たず、ほぼ平坦な周波数特性となることが特徴である。



<図4> 図1の回路構成における特性図



<図5> 図2の回路構成における特性図

この時、負荷電流に対するシャント抵抗R1の出力電圧の周波数特性に対して、一巡ループ特性の周波数補償として効果するように、インダクタンスL2を挿入する。シャント抵抗R1及びインダクタンスL2の周波数特性は、時定数を $\tau_1$ とすると式6となり、コーナ周波数を $f_1$ とすると式7となり、

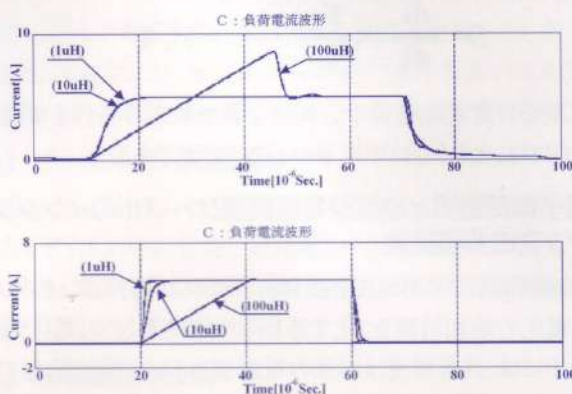
$$\tau_1 = \frac{L_2}{R_1} \dots \text{式6}$$

$$f_1 = \frac{1}{(2\pi \times \tau_1)} = \frac{L_2}{(2\pi \times R_1)} \dots \text{式7}$$

周波数 $f_1$ を境として高域周波数にて+6dB/octの振幅特性の、位相は最大で90°の進み位相となって、一巡ループ特性の安定度に対する周波数補償として効果的に作用する。

### 1-b) 時間領域の特性

シミュレーションの結果、従来技術では、制御系の周波数帯域が不足しているために立ち上がり時間が遅くなっているうえ、接続ケーブル3のインダクタンスが大きくなった時の飽和からの回復過程で設定電流を大幅に越えるオーバーシュートが発生している。これに対して、本技術での負荷電流波形は、十分早い応答を示し、接続ケーブル3のインダクタンスが大きい場合でも、オーバーシュートは極めてわずかであり、従来技術に比して優れた応答特性を示している。



<図6(上) 図7(下)> オーバーシュート

### 2) 非線形素子による特性改善

最終段の演算増幅器において負帰還回路にダイオードを挿入する事で、FETのゲート電圧に対応して増幅度が可変できる構成とした。終段の演算増幅器に非直線特性素子を挿入した場合、低域周波数において約40 [dB]の増幅度を可変し、FETによる増幅度の変化を補うことができる。また、この非直線増幅段の帰還回路にコンデンサを入れることで、FET段の周波数帯域の変動もある程度補い、負荷電流制御回路の総合ループ特性も、負荷電流の全範囲にわたって、充分な負帰還量と周波数帯域を確保して高速応答特性を維持したうえ、帰還ループの振幅余裕、位相余裕も確保することができる。

### まとめ

本製品でのループゲインが1となる周波数を見ると、およそ100倍の広帯域化がはかられている上、接続ケーブルのインダクタンスの変化に対しても、振幅余裕、位相余裕ともにはるかに勝っている。本製品は広範な周波数帯域における負荷電流応答特性を有しており、かつ被試験電源との接続ケーブルの寄生インピーダンスの影響も極めて受けにくいことから、被試験電源での急峻な負荷変動試験や起動時の特性評価試験などの高速負荷応答特性試験が可能となる。