

高速電子負荷技術解説

1. まえがき

近年マイクロプロセッサやLSI等の半導体負荷に供給する直流電源装置において、これら半導体の集積密度の大規模化、高速動作化に伴って低電圧大電流化への流れが進んでいます。これらに供給する直流電源にとって、負荷の動作状態における過渡的な負荷変動に対しても電源電圧の変動の少ない電源装置が求められ、これらの特性を評価あるいは検査するための実負荷に模擬できる電子負荷装置が求められるようになってきました。

弊社の新世代電子負荷装置としての製品系列では、高速動作に重点をおいたELS-304型、低電圧用途のELL-355型直流電子負荷装置を発売していますが、この技術資料では、その特徴や効果的な使用方法及び注意点について述べます。

2. 電子負荷装置の負荷モード

一般的な電子負荷として以下の4つの負荷モードがあります。

定電流モード: 電子負荷の負荷端子電圧(供試電源の出力電圧)には無関係に、設定電流に相当する一定負荷電流を流すように制御されます。

定抵抗モード: 設定抵抗値に相当した電流となるように、負荷端子電圧に比例した電流が流れるように制御されます。

定電力モード: 供試電源の出力電力が設定電力値となるように、出力電圧に反比例した電流となるように制御されます。

定電圧モード: 供試電源の出力電圧が設定電圧に一致するように(下がるまで)、負荷電流が制御されます。

これらのモードのうち、高速電子負荷装置の製品では特に定電流モードについて高速となるように設計されています。(その他のモードについても、汎用電子負荷装置に対しては、一般的に高速・広帯域となっています)

3. 定電流モードの動作原理

Fig1に動作原理回路図を示します。

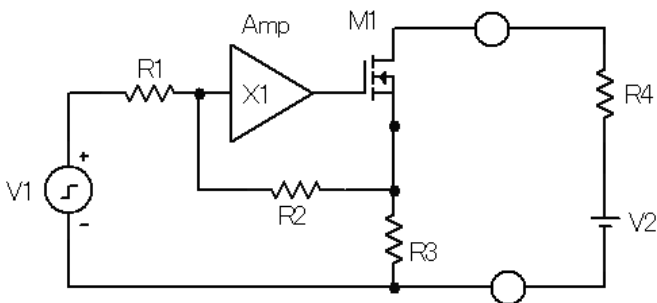


Fig1. 動作原理回路図

供試電源装置の出力電圧をV2として表し、その内部インピーダンスをR4に代表しています。負荷電流設定値に相当する電圧をV1に与えると、負荷電流制御トランジスタM1のゲート電圧を制御して負荷電流を流し、電流検出抵抗(シャント抵抗)R3に発生した検出電圧によって目的の負荷電流となるように誤差増幅器X1を介して負帰還ループが形成されます。ここで、負荷電流設定用電圧V1の電圧をe1(V)からe2(V)へと急激に増減させると、負荷電流もFig2の図のようにi1(A)からi2(A)へと変化することになります。

4. スルーレートの定義

負荷電流の変化する速度を一般的にスルーレート(SR)と呼んで Fig2 の波形図において以下のように定義します。

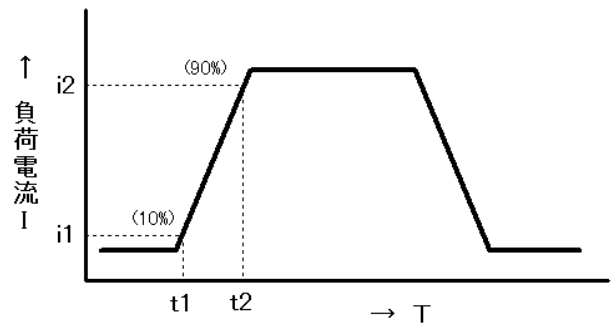


Fig2 負荷電流波形の例

$$SR = di/dt = (i2-i1)/(t2-t1) [A/s]$$

一例として、 $i1 = 10 [A]$ $i2 = 60 [A]$ $t1 = 0.1 [\mu s]$ $t2 = 0.6 [\mu s]$ の場合

$$SR = (i2-i1)/(t2-t1) = (60 - 10) / (0.6 - 0.1) = 50 / 0.5 = 100 [A/\mu s]$$

として表します。

また、Fig2の右側のように電流が減少する場面では $-100[A/\mu s]$ などと負号をつける場合もあります。電子負荷装置の高速性能を表す数値として、このスルーレートが重要な目安となります。

従来の一般的な電子負荷装置では、このスルーレートの数値が、 $2\sim 10[A/\mu s]$ が限界でしたが、当社ELS-304型では $200 [A/\mu s]$ を実現しました。

電流波形としても、電流制御回路の周波数帯域による制限があるものの、電流変化部分のスロープ(傾斜)ができるだけ直線的となるように制御されており、利用者にとって簡素化されてわかりやすい波形となっています。

当社の従来機種や他社の電子負荷装置に見られるように、任意スルーレートに設定できないものや、指数関数的な波形となってしまう、スルーレートが時々刻々変化し定量化しづらいものが一般的でした。

5. 供試電源電圧と最大スルーレートの関係

スルーレートの高い高速の負荷電流を綺麗な波形で流そうとした場合、それなりのノウハウが必要となります。

まず第一に供試電源の出力端子から電子負荷装置の負荷端子までを接続する電線によって寄生するインダクタンスや、電子負荷装置内部に存在する等価インダクタンスが重要な影響を及ぼします。

供試電源から負荷端子までのそれを Fig3 におけるL3,L4 として、また電子負荷装置内部のインダクタンスをL1,L2 に表し、供試電源の内部にもインダクタンス L5 が存在するので、電流ループ内の等価総インダクタンス L_s は

$L_s = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 [H]$ (各インダクタンス間の結合がなく、相互インダクタンス = 0 とした場合)となり、仮に $0.1[\mu H]$ あったとした場合、先ほどの例のように $SR = 100[A/\mu s]$ の時には

インダクタンスの誘起起電力 $e = L_s * (di/dt) = L_s * SR = 0.1$

$[\mu H] * 100[A/\mu s] = 10 [V]$
 となって電流スロープの増加局面では10[V]の電圧降下が、減少局面では10[V]の電圧上昇が発生します。

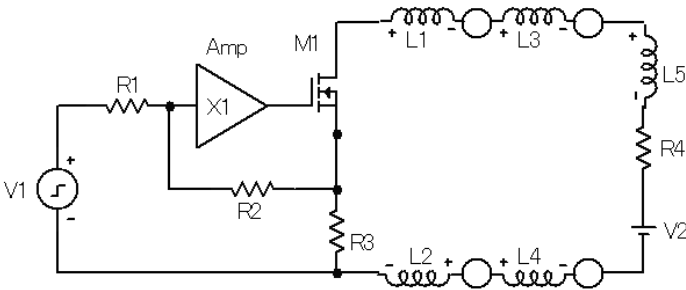


Fig3 負荷電流ループに寄生するインダクタンス

特に電圧降下時には、それ以上の高い出力電圧の供試電源でない限り、原理的に電子負荷装置内部の電流制御素子であるトランジスタの動作電圧がゼロ以下となって、正常な電流波形を流すことができなくなります。
 供試電源V2の出力電圧E [V]、等価総インダクタンス L_s [μH] とすると、原理的に可能な最大スローレート SR [$A/\mu s$] は $SR < E / L_s$ [$A/\mu s$] となります。

ここで仮定した0.1 [μH] のインダクタンスは、ごく大雑把に見積もっても、片道10cm 往復20cm程度の配線だけで寄生する値であり、5 [V] 出力の電源では 50 [$A/\mu s$]、2 [V] では 20 [$A/\mu s$] が理論限界値となります。

6. 電流ループ内の総インダクタンスを減らすには

等価総インダクタンスの値が高スローレートの負荷電流を実現する理論的な壁となりますが、これらの要素を分解して論じて見ます。
 1 番目の要素として、電子負荷装置の内部等価インダクタンスがどれだけ低いか、電子負荷装置の性能を表す指数となり、ELS-304型電子負荷の場合、およそ(0.05) [μH] 以下を実現しています。
 2 番目には、電子負荷装置の負荷端子による寄生インダクタンスであり、端子間隔による往復流通電流が形成する断面積に比例して発生します。
 3 番目には、負荷端子と供試電源の出力端子を結ぶ電線によるインダクタンスがあり、線長が長いほど、また線径の太い電線ほど往復線路の形成する断面積が増大して、等価インダクタンスも増加します。
 4 番目には、前記2番目と同様に、供試電源出力の端子形状によるインダクタンスが加わります。
 これらの総インダクタンスのうち、取りうる対策としては、3番目の接続電線を可及的に短くし、可能ならば供試電源を負荷端子に直結することです。電線で接続する場合には、往復線路の形成する断面積を増やさないようにツイストする等の工夫をすることです。
 また当社では極力等価断面積を減らした低インダクタンスケーブル(Low-Lケーブル)も用意しております。なお、より忠実な電流波形とするためには、前述の理論限界値よりもさらに0.5~1 [V] 程度の余裕を持たせることをお勧めします。

7. 電子負荷装置の使用例

1) 直流電源装置における、負荷電流の変化に対する過渡応答特性の測定

これはもっとも一般的な使用例で、直流電源装置を供試電源として、電流変化率SR(スルーレート)の高い負荷電流に対する出力電圧変動の特性を試験する用途です。
 前述のように負荷接続電線のインダクタンスを最小にする事が大切です。

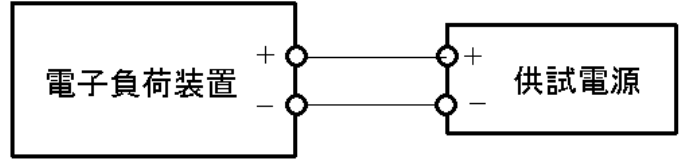


Fig4 直流電源の過渡応答特性試験

負荷電流のスローレートを変化させた時に、供試電源出力端子の電圧がどのような応答をするか、オシロスコープ等にて観測し、瞬時電圧変動のPeak-to-peak電圧や電圧波形を測定します。これによって、供試電源出力端子から見た内部インピーダンス、ESR(等価直列抵抗)、ESL(等価直列インダクタンス)等を知ることができます。
 パラメータとして、負荷電流を I1 から I2 に、またその電流変化率SRを任意に変化させながらその時の電圧変動の様子を観測することができます。この方法では、特定周波数の微小信号による交流インピーダンス測定方法等に比較して、供試電源装置や電源バイパスコンデンサ等の特性評価を、実負荷に近い条件で試験できる利点があります。

2) コンデンサのESL・ESR測定

前項と同様に、電源バイパスコンデンサ等の単体素子について実負荷に近い条件で、その特性評価を行います。供試素子は端子T1とT2の間に接続されたもので、コンデンサCxとそれに寄生するESR、ESLをRx、Lxとして等価回路で表してあります。
 動作状態の直流電圧をインダクタンスL1、L2を通して補助電源V1によって印可します。L1、L2のインダクタンスはLxに比べて十分大きな値(1 μH 以上が望ましい)にすることによって、それに流れる高周波電流の影響を十分小さくできます。

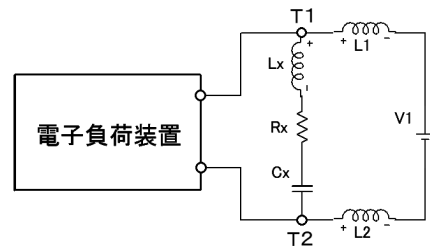


Fig5 コンデンサのESR、ESL測定方法

コンデンサ電流を I1 から I2 に、またその電流変化率SRを任意に変化させながら、コンデンサ両端の電圧を測定します。電圧測定にあたっては、プローブ先端が供試素子から最短距離になるように、かつ電流端子との電磁結合が最小となるように直交させる配慮が必要です。

8. 供試電源電圧を超えるインダクタンスの電圧降下がある場合の便宜的使用方法

供試電源電圧がきわめて低い時や、接続電線の長さが影響して、目的のスローレートにできない場合には、Fig6のように直流補助電源を直列に接続し電子負荷装置に対しては等価的に高い直流電圧にすることで、便宜的に改善することができます。

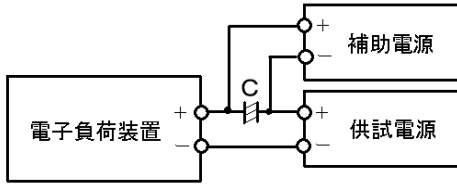


Fig6 電圧が低い場合の改善方法

この場合にも、補助電源を接続する電線のインダクタンスが加わらないように、電子負荷装置と供試電源を結ぶ高周波数における電流ループが最小となるように低インピーダンス大容量のコンデンサーCを最短距離で接続します。補助電源の電圧の値は、負荷電流の変化の大小とスルーレートの値によって、電子負荷端子の電圧がおよそ1[V]以上必要です。補助電源電圧を可変させながら、負荷電流波形が歪まない範囲で最小になるようにし、電子負荷装置の許容最大電力を超えないようにしてください。このほか、前記 Fig5 の例のような場合でも、同様に補助電源を附加することで、改善することができます。これら、補助電源を使う方法は、本質的にインダクタンスの影響を除去できるものではなく、電子負荷端子における電圧変動が大きくなる事による新たな誤差が加わるものであり、あくまでも便宜的な方法であります。

9. ESR, ESL による電流と電圧の関係

供試直流電源において、高速な負荷の変化に対する出力電圧の変動を試験する場合、本器の電子負荷装置によって高いスルーレートを持つ台形波形の負荷電流による方法が実負荷に近い状態で特性を評価する最良の方法です。様々な負荷電流において、そのスルーレートをパラメータとして出力電圧を観測し、その電圧変動が実負荷に求められる許容電圧範囲内の電圧精度にて安定に供給することができるか、直接的に試験することができます。

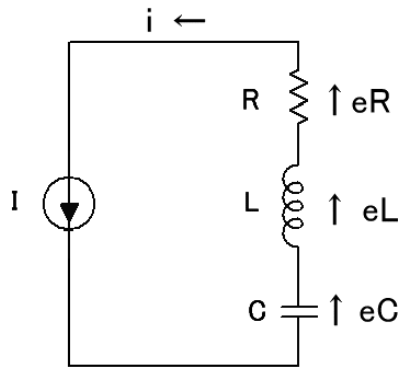


Fig7 バイパスコンデンサの等価回路

また、電源装置の平滑コンデンサ等に求められる性能として、等価直列抵抗 (ESR) 及び等価直列インダクタンス (ESL) がどの程度低いかという特性が重要です。この試験においても、従来行われているような比較的low周波数の微小交流電流によるインピーダンス測定では、必ずしも実動作時の特性を表していない等の問題があります。このようなコンデンサのESR, ESL測定に対しても、本電子負荷装置による方法はきわめて有効です。そこで、台形波形の電流に対する供試電源の出力電圧やコンデンサ端子等の電圧波形の関係について、簡単に説明します。

Fig7 はコンデンサの場合の等価回路を表し、等価直列抵抗 (ESR) をR、等価直列インダクタンス (ESL) をL、コンデンサを

Cと定義します。供試電源の出力インピーダンスの等価回路に模擬する場合にはコンデンサCの代わりに、直流起電力E(V)として、R成分とL成分に単純化する方法が簡便です。

ここで、負荷電流波形として、Fig8 最上段のiのような台形波形がFig7 におけるiの矢印方向であるとし、この電流に対する等価回路のR、L、C各両端の電圧eR、eL、eCは

$$eR = i \times R$$

$$eL = (di / dt) \times L = (i3 - i2) / (t3 - t2) \times L$$

Fig8 台形波電流に対する各素子の電圧波形

$$eC = \int idt \times 1/C$$

コンデンサ両端の電圧eは

$$e = eR + eL + eC$$

となります。コンデンサの容量が大きい場合には、eC = 0と見なしてもかまいません。

抵抗Rの電圧は電流波形そのものに比例した相似波形で単純です。

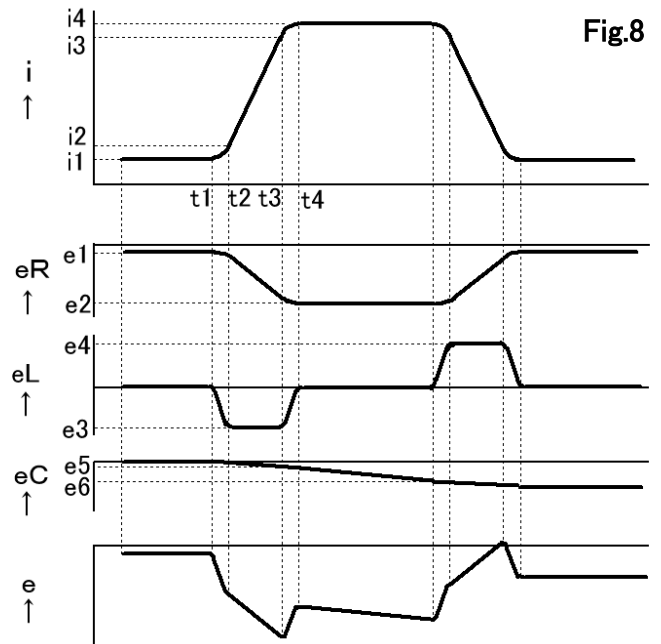


Fig8

一方インダクタンスLの電圧は電流波形の瞬時瞬時の微分値に比例するため、時々刻々微分値が変化するような電流波形ではそれに対応する電圧値も変化することになります。

これに対しできるだけ直線的に変化する台形波形の場合には、Fig8 のt2~t3 区間のように一定の傾斜であるために、それに対応するインダクタンスの電圧 eL もe3, e4のように、一定な値でフラットになります。それだけ、両端子から観測できる電圧 eも単純化されて測定しやすくなります。

このように、台形波形の電流に対する電圧変動波形から、ESL, ESRを計算によって求めることができます。

本器のように、大電流かつ高いスルーレートの台形波電流を流すことができる事によって、直流電源やバイパスコンデンサなどの極めて低いESL, ESRに対しても実負荷に近い環境において評価することができ、又スルーレートを様々に変えたときの電圧変動や、非線形特性を持つ供試体に対する電圧変動も、直接的に試験することができます。