

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

§0.要約

電流検出抵抗器による電流の測定は、「抵抗器の両端に生じる電位差と抵抗器を通過する電流が比例する」関係を用いますが、高周波数帯では寄生インダクタンスの影響でこの関係が成り立ちません。高周波数帯で正確に電流を測定する為には、CRフィルタを用いる等の、寄生インダクタンスの影響を減らす事が有効です。

また、高周波数帯では表皮効果の影響で抵抗器を通過する電流波形が歪み、CRフィルタによる補正が出来ない場合があります、注意が必要です。

§1.電流検出抵抗器の等価回路

抵抗器の最も簡単な等価回路を図1に示します。ほとんどのアプリケーションでこの等価回路を用いて回路計算を行う事が出来ます。

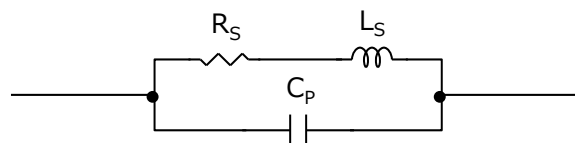


図1 抵抗器の等価回路

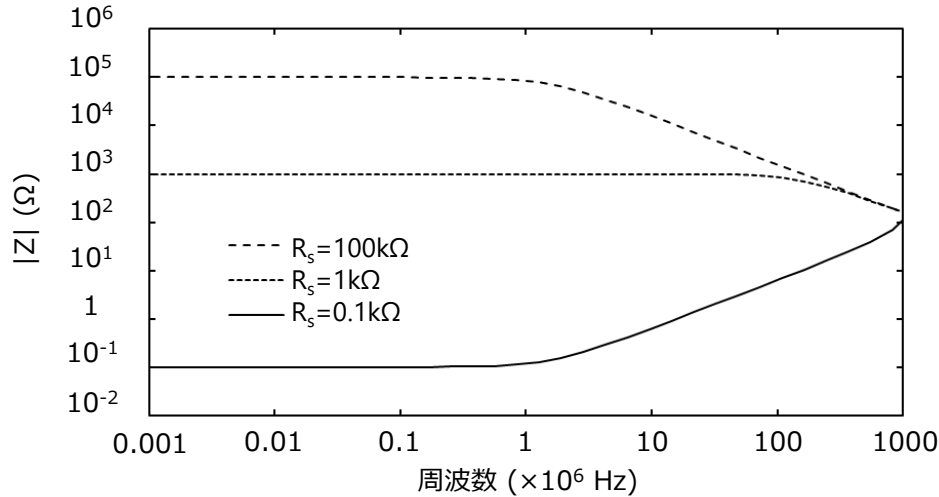
R_S は抵抗成分、 L_S はリード線や抵抗器の長さに起因する寄生インダクタンス、 C_P は電極間などに存在する寄生容量です。 L_S 、 C_P は少ない事が望ましく、抵抗器の小型化や構造の工夫などにより低減が進んでいます。ただし高周波領域ではこれらがおよぼすインピーダンス特性への影響に注意して下さい。

また、その影響度が R_S の大きさによって異なることにも注意が必要です。図2に $L_S=10\text{nH}$ 、 $C_P=1\text{pF}$ 一定とし、 $R_S=0.1\Omega$ 、 $1\text{k}\Omega$ 、 $100\text{k}\Omega$ と変化させた場合のインピーダンスの周波数特性を示します。

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP


 図2 インピーダンス|Z|の周波数特性に対する R_s の影響

R_s が100k Ω と0.1 Ω の抵抗器では、1MHz以上の帯域でそれぞれ容量性、誘導性と真逆の特性を示しています。また R_s が1k Ω の抵抗器では他よりも高い周波数まで抵抗としての特性を維持していることが分かります。これは R_s と L_s 、 C_p のインピーダンスの比によるもので、 R_s が低いほど L_s のインピーダンスへの影響がより低い周波数から現れます。また C_p の影響は L_s に比べると著しく小さいため、 L_s の影響が大きく現れる低抵抗値の電流検出抵抗器では、 C_p を無視して考える事ができます (図3)。

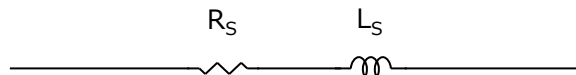


図3 低抵抗 電流検出抵抗器の等価回路

§2. L_s の電流検出への影響

電流検出抵抗器は、電流経路へ直列に配置し、そこに生じる電圧降下と抵抗器の抵抗値から電流値、電流波形を算出します。ここで問題となるのは、高周波領域での L_s の影響です。図3の等価回路で $R_s=10\text{m}\Omega$ 、 $L_s=10\text{nH}$ とした場合の、100Hz時、1MHz時のインピーダンスは下記になります。

$$Z (\text{m}\Omega) @100\text{Hz} = 10 + j0.0063$$

$$Z (\text{m}\Omega) @1\text{MHz} = 10 + j63$$

L_s のインピーダンスへの影響は、100Hzでは R_s の1/1000以下であり、無視できます。一方、1MHzでは R_s の6倍以上となっており、電圧降下と抵抗値の計算だけでは正確な電流値、電流波形を算出する事ができません。

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

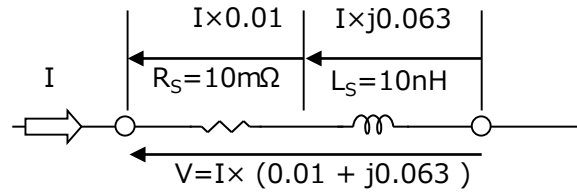
電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響


図4 10mΩ抵抗器の1MHzにおける電圧降下

図4の計算は正弦波形を前提としています。次に、実際の測定対象となることが多い直線状に変化する波形に対する影響を考えます (図5)。

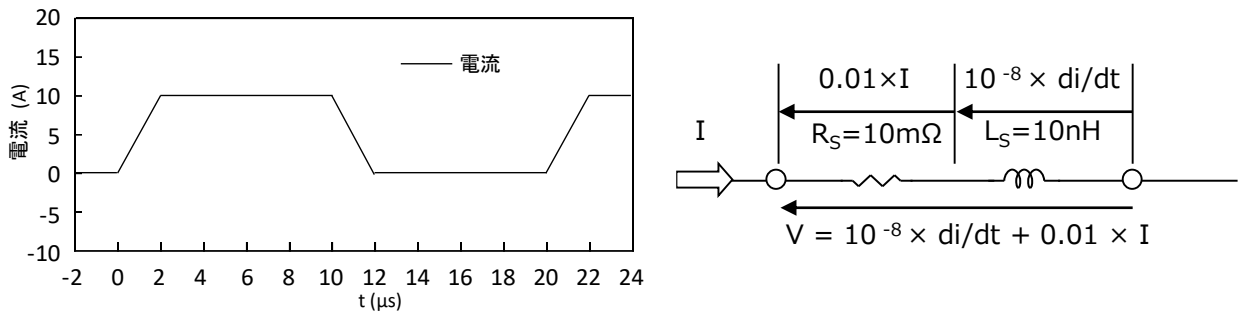
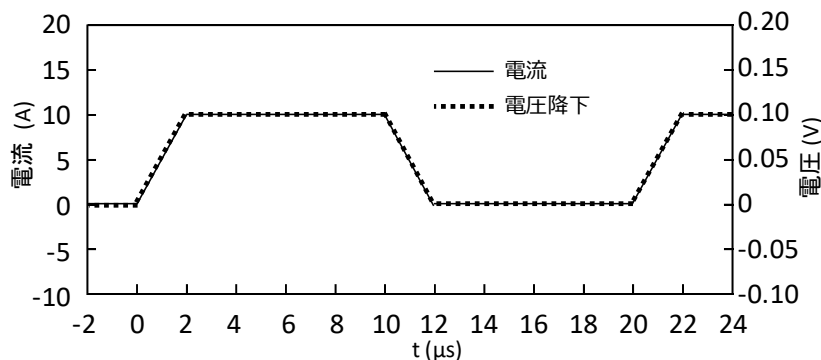


図5 直線状に変化する電流波形と電圧降下

抵抗器の両端電圧Vは、式 (1)で表します。

$$V = L_S \times di/dt + R_S \times I \quad (1)$$

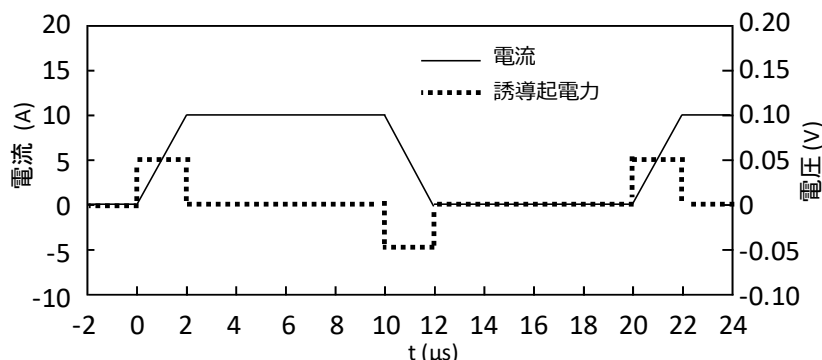
第一項の $L_S \cdot di/dt$ は L_S と電流の変化率によって生じる誘導起電力、第二項の $R_S \cdot I$ は R_S と電流による電圧降下です。これらを波形で表すと図7、図6のようになります。


 図6 $R_S \times I$ による電圧降下

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

 図7 $L_s \times di/dt$ による誘導起電力

抵抗器両端で測定される電圧波形は、図6、図7を足し合わせた図8の波形となります。

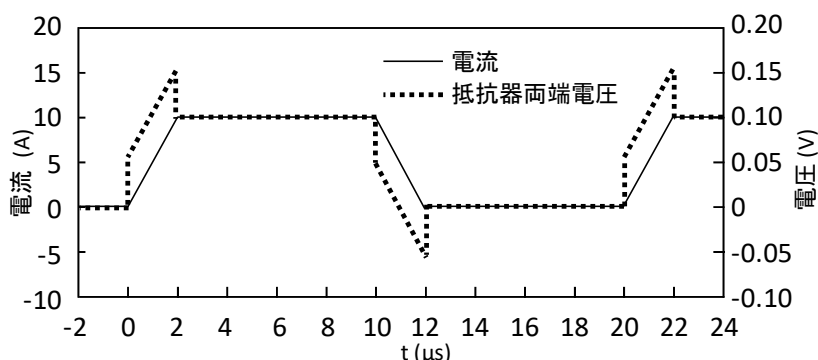


図8 抵抗器両端の電圧波形

L_s による誘導起電力の大きさは電流の変化率に比例します。 L_s が小さい抵抗器を選定したとしても、電流変化が急峻な場合には非常に大きな誤差が生じることに注意が必要です。これをDC/DCコンバータの出力電流検出回路を例に説明します。図9のように回路パラメータを仮定し、電流検出抵抗器に流れる電流を計算すると、図10の電流波形となります。

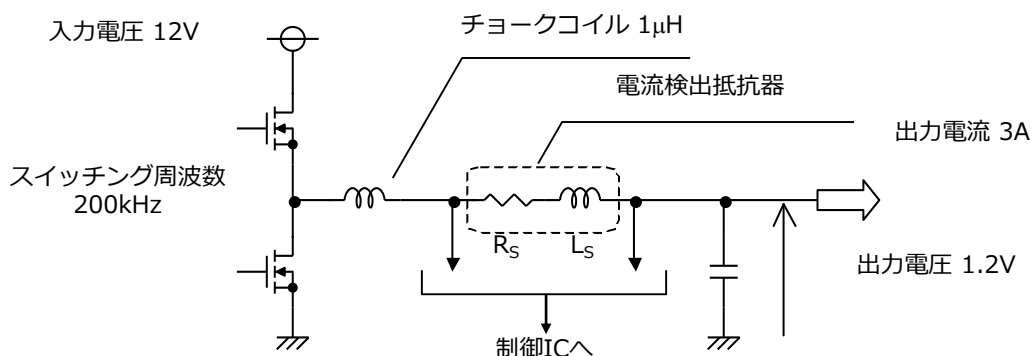


図9 DC/DCコンバータ出力回路

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

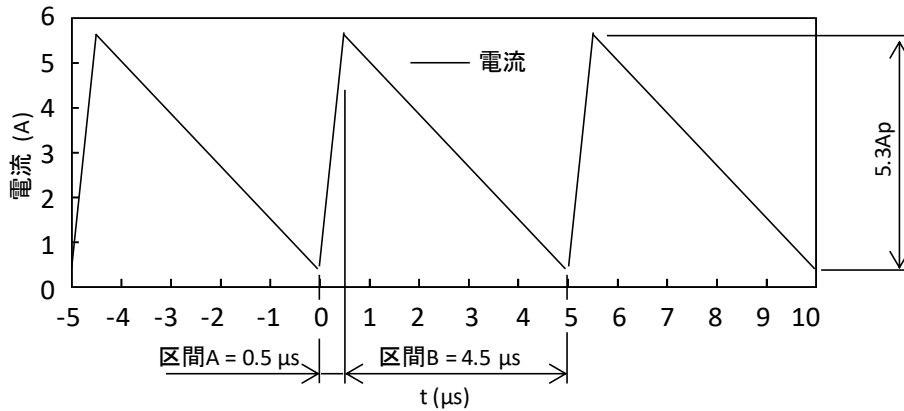
電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響


図10 電流波形

電流が直線状に増加する期間を区間A、減少する期間を区間Bとします。電流検出抵抗器を $R_S=10\text{m}\Omega$ 、 $L_S=10\text{nH}$ とした場合の両端電圧波形は図11となります。

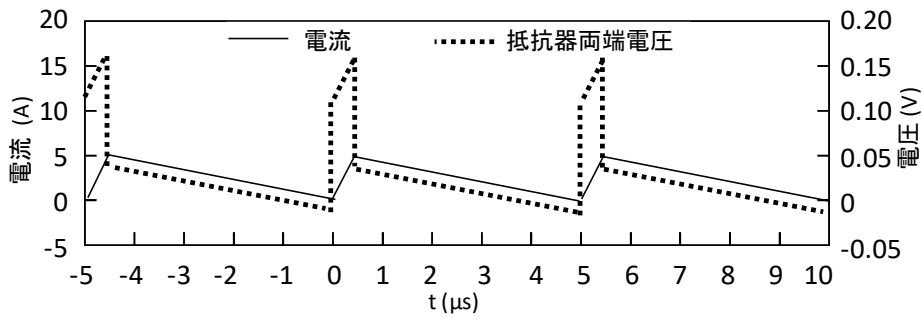


図11 電流検出抵抗器の両端電圧波形

電流波形の最大値5Aに対して、電圧波形から算出される最大電流値は3倍と大きな誤差が発生しています。誤差の原因を計算によって確かめます。

まず、区間A、Bの電流変化率 di/dt を求めます。

$$\text{区間A } di/dt = 5.3 / 0.5 \times 10^{-6} = 1.06 \times 10^7 \text{ (A/s)}$$

$$\text{区間B } di/dt = -5.3 / 4.5 \times 10^{-6} = -1.18 \times 10^6 \text{ (A/s)}$$

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

TECHNICAL NOTE
テクニカルノート

L_S と di/dt から求めた誘導起電力は下記になります。

区間A	L_S 誘導起電力 = 0.106 (V)
区間B	L_S 誘導起電力 = -0.0118 (V)

これに対して R_S の電圧降下の振幅は下記になります。

$$R_S \text{電圧降下振幅} = \text{抵抗値} \times \text{電流振幅} = 10 \times 10^{-3} \times 5.3 = 0.053 \text{ (V}_{p-p}\text{)} \text{ 式 (2)}$$

R_S 電圧降下振幅に対して、 L_S 誘導起電力を加えた値は約3倍になっています。同じ L_S を持った電流検出抵抗器でも、抵抗値を高くすると誘導起電力による誤差の割合は小さくなります。図12は R_S を50mΩに変更した例です。

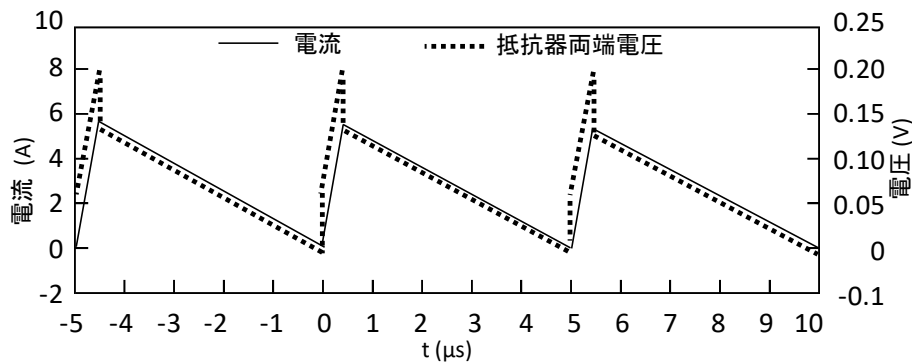


図12電流検出抵抗器の両端電圧 $R_S = 50 \text{ (m}\Omega\text{)}$

正確に電流を検出する観点からは、高い抵抗値を選定するのが好ましいですが、損失は抵抗値に比例して増加します。搭載できる抵抗器の大きさ、放熱パターンの広さ、周辺に配置される部品の発熱量などから、シミュレーションなどを用いて温度上昇を推測し抵抗値を選定します。以上より、電流検出抵抗器選定の注意点を下記にまとめます。

- (a) 寄生インダクタンスの小さい電流検出抵抗器を選定する。
- (b) 温度上昇が許容できる範囲でなるべく高い抵抗値を選定する。

(b)項は、S/N向上の点からもお勧めします。

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に同意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

§3. 寄生インダクタンスの影響を減らすには

電圧検出パターンに抵抗器と逆位相の誘導起電力を発生させることで、信号を打ち消して寄生インダクタンス L_s の影響を減らすことができます。そのためには、電圧検出パターンは、抵抗器の直下に配置し、抵抗器の電流経路と並行になる部分をできるだけ長くするように配線して下さい(図13 (a), (b)と図14 (a), (b))。

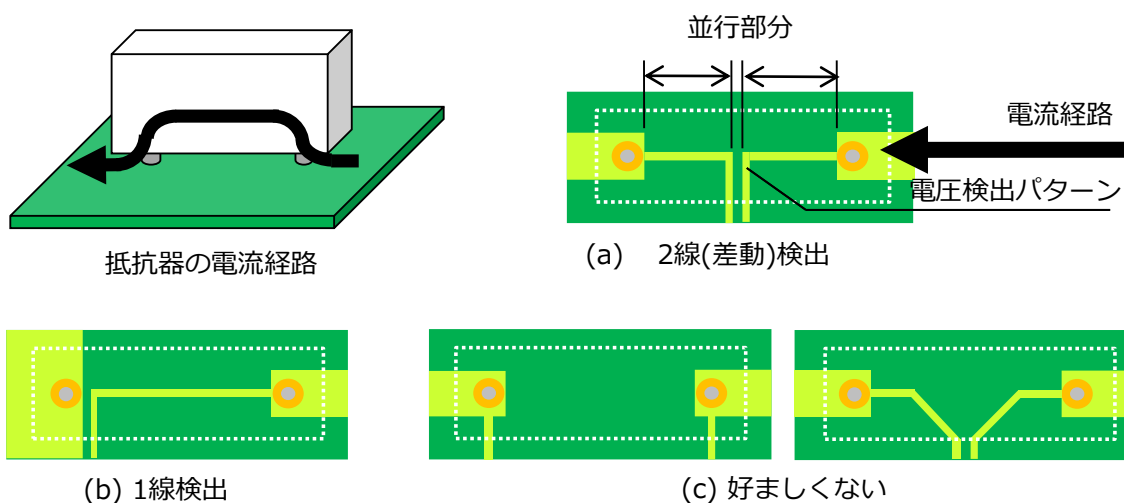


図13 リード付部品の電圧検出パターン配線例

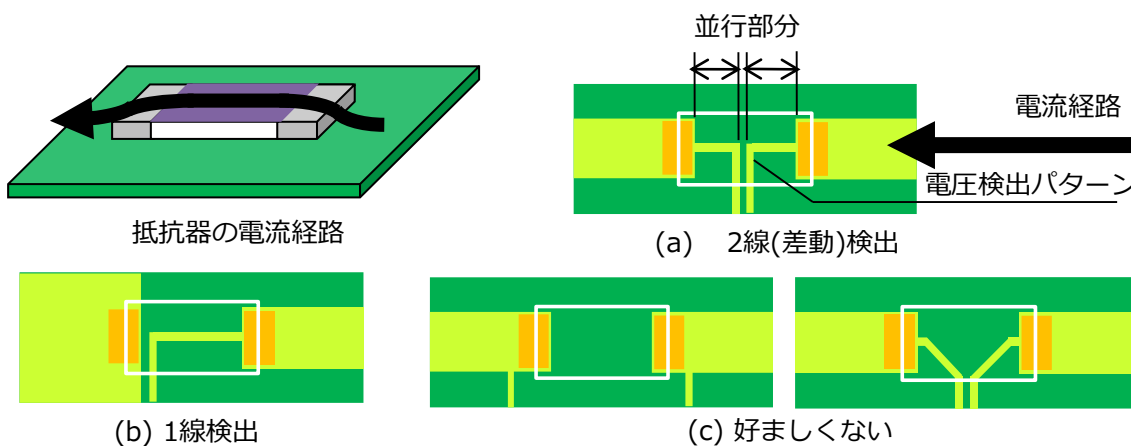


図14 表面実装部品の電圧検出パターン配線例

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

電圧検出パターンによる寄生インダクタンスの影響の削減だけでは不十分な場合、検出アンプの入力にフィルタを追加して下さい。フィルタ回路の構成、パラメータの選定は下記を参考にして下さい。

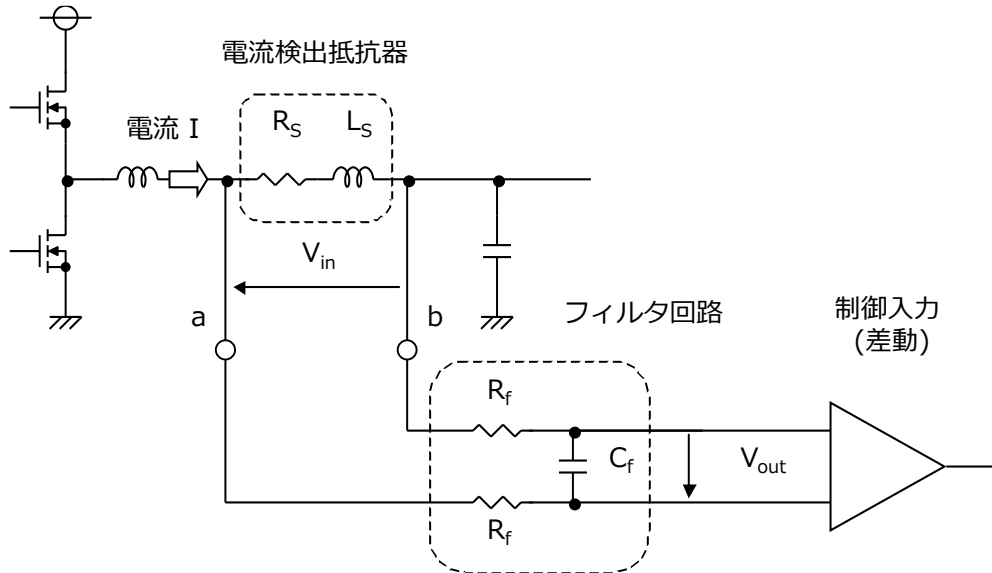


図15フィルタ回路（差動検出）

ここで、a、b点から電流検出抵抗器を見たインピーダンス $|Z_r|$ が、フィルタ側を見たインピーダンス $|Z_f|$ よりも十分に低ければ、次の式が成り立ちます。

$$V_{in}(t) \doteq R_S \times I(t) + L_S \times di(t)/dt \quad (3)$$

(ラプラス変換後との区別のため、時間関数は $V_{in}(t)$ 、 $I(t)$ 、 $di(t)/dt$ としています)

両辺をラプラス変換すると、

$$V_{in} \doteq R_S \times I + S \times L_S \times I \quad (4)$$

(Sはラプラス演算子、V、Iは正しくは $V(S)$ 、 $I(S)$ ですが以下では省略します)

$$V_{out} \doteq V_{in} / (1 + S \times C_f \times 2 \times R_f) \quad (5)$$

$$= I \times R_S \times (1 + S \times L_S / R_S) / (1 + S \times C_f \times 2 \times R_f)$$

従って

$$V_{out} = I \times R_S \times (1 + S \times L_S / R_S) / (1 + S \times C_f \times 2 \times R_f) \quad (6)$$

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

TECHNICAL NOTE
テクニカルノート

ここで、

$$L_S / R_S = C_f \times 2 \times R_f \quad (7)$$

ならば、いかなる周波数成分に対しても次の関係が成り立ちます。

$$V_{out} = I \times R_S \quad (8)$$

従って、電流検出抵抗器の R_S 、 L_S が分かっているならば、 $|Z_r| \ll |Z_f|$ となるように C_f と R_f を選定すれば良い事になります。

例えば、 $R_S=0.01\Omega$ 、 $L_S=10\text{nH}$ であれば $L_S / R_S = 10^{-6}$ です。ここで、 $R_f=100\Omega$ とすると、 $L_S / R_S = C_f \cdot 2 \cdot R_f$ を満たす為の C_f は次の様に算出されます。

$$C_f = 10^{-6} / 200 = 5 \times 10^{-9} (\text{F}) = 0.005 (\mu\text{F}) \quad (9)$$

この条件で周波数10MHzに於ける破線abから電流検出抵抗器を見たインピーダンス Z_r と、フィルタ側を見たインピーダンス Z_f を比較すると次の様になります。

$$Z_r \doteq 0.01 + j0.63 (\Omega)$$

$$Z_f \doteq 200 - j3.18 (\Omega)$$

$|Z_r| \ll |Z_f|$ の条件が満たされている事が分かります。実際にはノイズ除去の観点から $|Z_f|$ が大きすぎるのも好ましくないため、波形を見ながら適宜調整します。

制御入力が入線検出の場合には、図16の様にフィルタを入れ、同様の考え方で次の式が成り立つように C_f と R_f を選定します。

$$L_S / R_S = C_f \times R_f \text{ かつ } |Z_r| \ll |Z_f|$$

この時、電流検出抵抗器のGNDとフィルタのGNDは極力接近させて配置します。

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

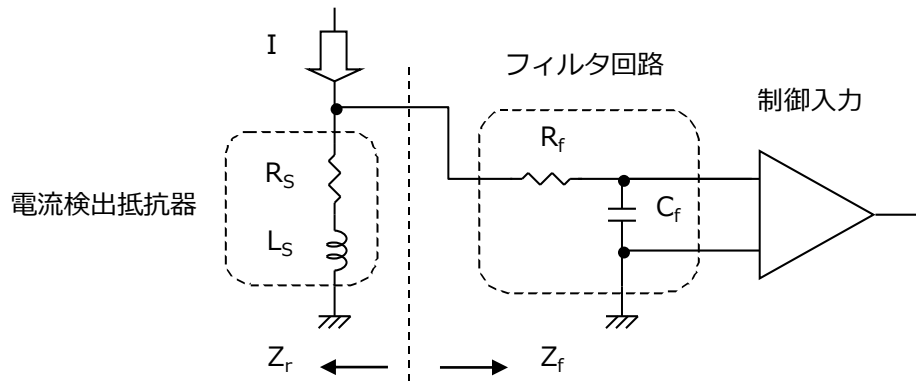


図16 フィルタ回路 (1線検出)

なお、先述のとおり実装状態での見かけ上の L_s は、電圧検出パターンの影響を受けます。抵抗器メーカーから提供される L_s のデータは、多くの場合、実際の実装状態における値とは多少異なります。最終的には実機にて正しい電流波形が得られる様にフィルタ定数の微調整が必要です。

§4.低寄生インダクタンス製品

一般的にリード付部品よりも表面実装部品の方が寄生インダクタンス L_s は低くなります。当社表面実装部品の中で低 L_s の代表的な製品はTLRです。 L_s は1nH以下であり、電圧検出パターン配線の工夫で見かけ上の L_s を0.1nH以下に抑えることも出来ます。特に高速に変化する電流を検出する用途には最適です。

リード付き部品は大電力用途などで使われていますが、 L_s は表面実装部品に比べて一桁以上大きくなります。BPRなどの平面金属板抵抗体を使用した製品でも10nH~20nH程度です。高速に変化する電流を検出する用途ではフィルタの追加をご検討下さい。

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

§5.表皮効果の影響について

表皮効果とは、交流電流が導体を通るとき、周波数が高いほど電流が導体の表面に集中し、導体の抵抗が高くなる現象です。

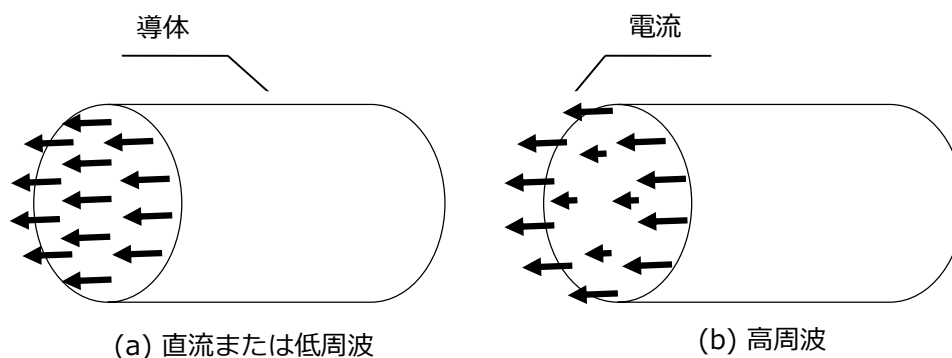


図17 表皮効果

導体を通る電流は、導体の抵抗率が均一であれば、直流または低周波においては図17(a)のように導体内を均一に流れています。

周波数が高くなるにつれて図17(b)のように導体の中心を通る電流が減少していきます。

電流が表面電流の $1/e$ になる深さ（表皮深さ δ ）は次の式で表されます。

$$\delta = (2 \times \rho / \omega / \mu)^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (10)$$

ρ は導体の抵抗率(S / m)、 ω は電流の角周波数(rad / s)、 μ は導体の透磁率(H / m)です。

正弦波交流電流に対する表皮効果の影響は、抵抗の増加という単純な現象で現れますが、実際の波形による影響は複雑になります。

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に同意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP

電流検出抵抗器の寄生インダクタンス影響

TECHNICAL NOTE
テクニカルノート

図18に寄生インダクタンス、表皮効果の影響が大きな抵抗器を使用して、DC/DCコンバータの出力電流を検出した電圧波形の例を示します。

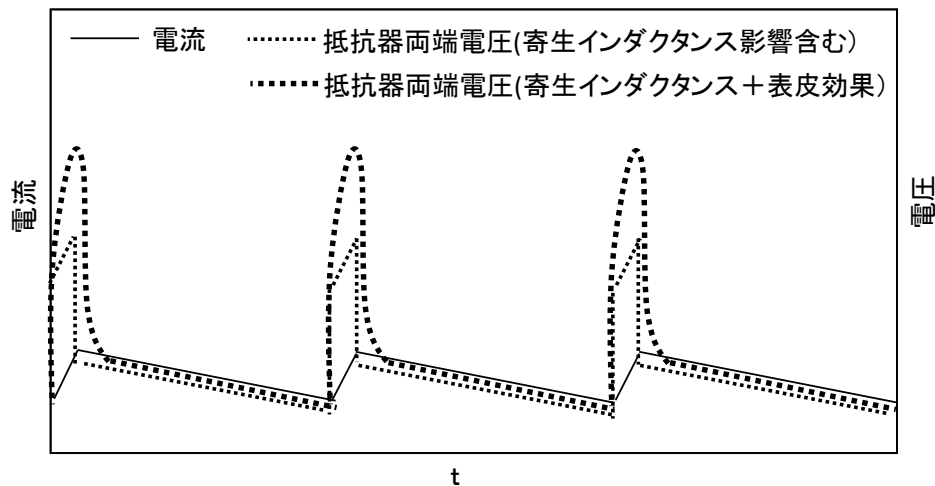


図18 表皮効果の影響を受けたDC/DCコンバータ出力電流検出波形

寄生インダクタンスの影響だけを受けた波形よりも、複雑な波形の歪を生じていることが分かります。また図18は一例であり、電流波形に含まれる高調波成分の違い、抵抗器の特性などによって全く異なる波形が現れることもあります。

このような表皮効果の影響をフィルタで削減することは難しく、製品、抵抗値の選択による対策が必要になります。

式(10)から、抵抗器の表皮効果の影響の大きさは、抵抗体の形状、材料特性の影響を受けることが分かります。具体的には、抵抗体の断面積が小さく、材料の抵抗率が大きく、透磁率が低いほど影響は小さくなります。

当社の電流検出抵抗器の中で、表皮効果の影響が少ない製品は、厚膜抵抗体を使用したSR73, UR73です。

一般的には抵抗値が高いほど表皮効果の影響は小さくなりますが、同一の抵抗値であっても、製品によって抵抗体の形状、材料が異なるため、削減効果の大きさにも差が生じます。

詳細は、電流波形、周波数などの情報を添えてお問い合わせください。

以上

ご注意 この文書は予告なしに変更される場合があります。

技術的なお問い合わせはこちらよりお願いいたします。 https://www.koaglobal.com/tech_support/productsForm

本文のご利用に際しては、右記URLの免責事項に合意したものとみなします。 https://www.koaglobal.com/utility/disclaimer_TecDoc?sc_lang=ja-JP