DCDC コンバーターの入力フィルター

DCDC コンバーターによって伝導されるエミッションを削減するための入力フィルターの検討

前書き

DC / DC コンバータは、電源ラインを介して伝導エミッションノイズを放出します。多くの DC / DC コンバーターコントローラーIC には、スペクトラム拡散機能が組み込まれているため、ノイズフィルター部品のサイズ、および、BOM コストを削減できます。伝導エミッションのレベルを許容可能なレベルまで下げるには、入力フィルターが必要です。このアプリケーションノートは、DC / DC コンバーターの入力フィルターの設計について説明しています。

伝導性エミッションの発生原因

DC / DC コンバーターの入力電流は、DC / DC コンバーターのスイッチング周波数に応じて変化します。入力コンデンサの等価直列抵抗（ESR）は、交流入力電流によって電圧リップルを引き起こします。発生する電圧リップルの振幅は、使用するコンデンサの ESR に本質的に依存します。

電解コンデンサとポリマーコンデンサの ESR は数 mOhm から数 Ohm と比較的高くなっています。そのため、この種のコンデンサを使用すると、電圧リップルが大きくなります。一方、多層セラミックコンデンサ（MLCC）の ESR は数 mOhm と非常に小さいため、電圧リップルは数 mV になります。

オシロスコープを使用して、DC / DC コンバーター入力の AC 波形を分析できます。これにより、DC / DC コンバーターの設計段階での干渉スペクトルの測定が容易になり、伝導性エミッション/ EMC の問題を簡単に推定できます。

これにより、DC / DC コンバーターの設計段階での干渉スペクトルの測定が容易になり、伝導エミッション/ EMC の問題を推定する簡単な方法が提供されます。

例として、図 1 は、スイッチング周波数が 2.2MHz の自動車用 DC / DC コンバータ BD9Pxx5xx シリーズの入力リップル電圧を示しています。

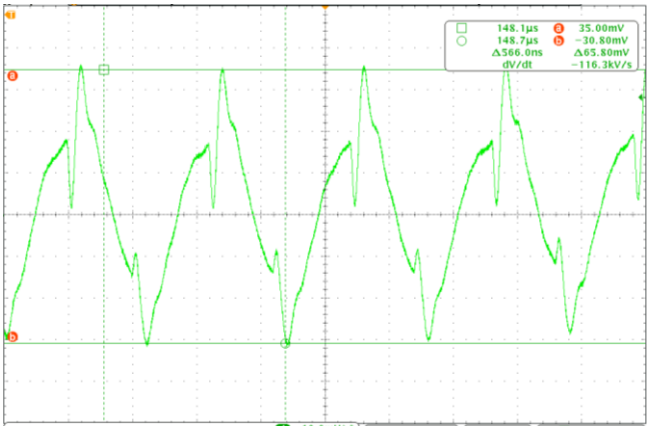

図 1：DC / DC コンバータの入力コンデンサでの電圧リップル

アプリケーション動作条件は、12V DC 入力電圧、5V DC 出力電圧、抵抗性負荷 1A です。

© 2020 ROHM Co., Ltd.

このアプリケーション例では DC / DC コンバータの入力コンデンサとして MLCC を使用しています。この場合、MLCC の低 ESR にもかかわらず、入力リップル電圧は 68mV です。このリップル電圧により、差動モードノイズが発生し、DC / DC コンバーター入力で伝導エミッションノイズが発生します（図 2 を参照）。

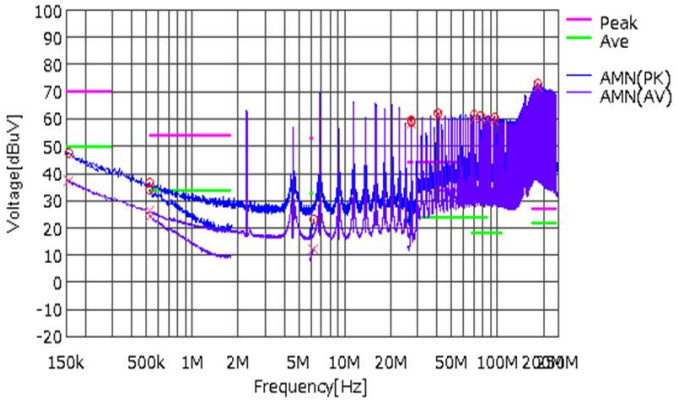

図 2：入力フィルターなしの場合の DC / DC コンバーターによる伝導エミッションノイズ

図 2 は、150 kHz～300 Mhz の周波数範囲内で自動車用 CISPR25 規格に基づく伝導性エミッションテストの結果を示しています。 この場合、スペクトラム拡散は無効になっており、DC / DC コンバーターは一定 PWM モードです。DC / DC コンバータのスイッチング周波数と同じ 2.2MHz に 65 dBμV ピークの基本ノイズが確認できます。その他の高調波ノイズのピーク値は、許容ノイズリミットを超える 20 dBμV 以上です。

伝導性エミッションの削減

電磁両立性（EMC）テストに合格するためには、DC / DC コンバーターの伝導エミッションを減らすための入力フィルターが必要です。図 3 は、前述の入力フィルターを備えた DC / DC コンバーターからの抑制された伝導エミッションの結果を示しています。

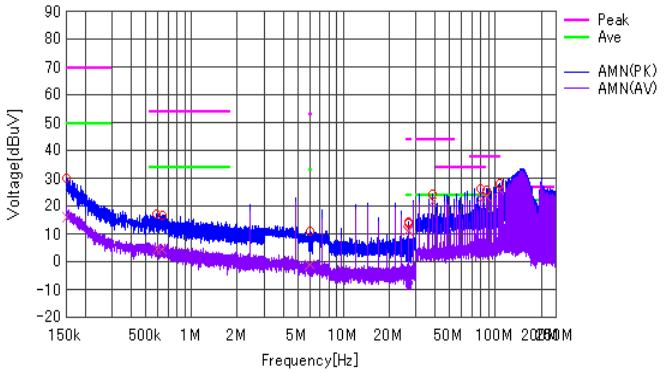

図 3：入力フィルターを使用した DC / DC コンバーターの伝導エミッションノイズ

アプリケーション動作条件は前述と同じです。スペクトラム拡散機能は無効であり、DC / DC コンバーターの動作モードは固定 PWM モードです。

平均（AV）とピーク（PK）のノイズレベルは、全周波数範囲で低く、許容可能なレベルまで低下しています。

入力フィルタの主な目的は、前段電源からのノイズとサージを抑制し、スイッチング周波数とその高調波周波数での干渉信号を減少させて、この電源に接続される他のデバイスへの悪影響を防ぐことです。

通常、図 4 に示すようなπタイプの入力フィルターを使用して、入力電流をフィルターします。これにより、AC 電圧リップルの振幅が減少し、伝導性エミッションが低く抑えることが可能になります。

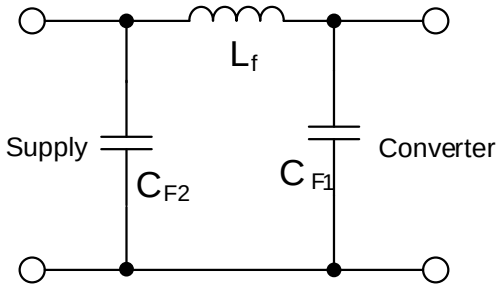

図 4：πタイプの入力フィルター

© 2020 ROHM Co., Ltd.

入力フィルターの設計

入力フィルターを設計する最初のステップは、AC 振幅を低減するために使用されるコンデンサーを DC / DC コンバーターIC の入力に接続することです。 ハイパスフィルターバイパスコンデンサのように機能します。以降、CF1 と呼びます。

この場合、入力コンデンサとして MLCC を選択できます。 MLCC は ESR が無視できるほど低いため、高周波電圧を低インピーダンスでグランドにすばやく短絡できます。 AC リップルの周波数は同じです。バイパスフィルタコンデンサの容量は、DC / DC コンバータ IC のスイッチング周波数に近い自己共振周波数のものを選択する必要があります。

図 5 は、パッケージサイズが EIA1206 の 4.7 μF MLCC コンデンサのインピーダンスと ESR 曲線を示しています。

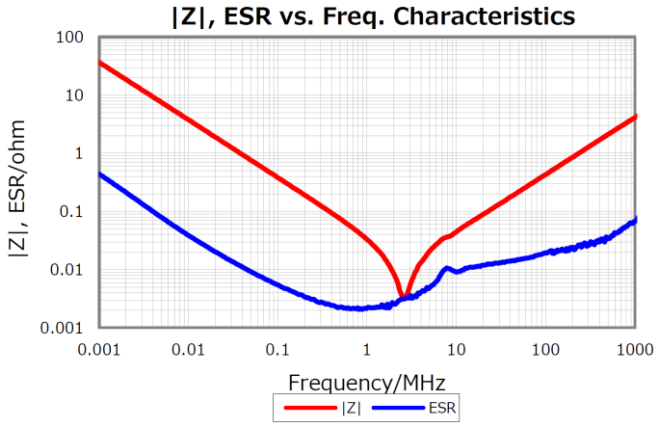

図 5：4.7μF MLCC の ESR 特性

MLCC のインピーダンスは、自己共振周波数（SRF）で ESR が最も低くなります。 AC ノイズを低インピーダンスで GND に逃がすには、低 ESR のものを使用する必要があります。

2.2 MHz のスイッチング周波数で動作する BD9Pxx5xx などの DC / DC コンバータ IC を使用する場合、図 5 に示すように、EIA0805 チップサイズの 4.7 μF MLCC がバイパスフィルターコンデンサとして推奨されます。

次に、フィルタインダクタ（以降、LF と呼びます）とフィルタコンデンサ CF2 を配置して、LC フィルタを形成します。 LC フィルターは、入力からのノイズを出力側で 40 dB /decade で低減します。

DC / DC コンバーターからのノイズを低減するには、LC フィルターをスイッチング周波数の 1/10 のコーナー周波数で最適化する必要があります。コーナー周波数 fCf は式（1）で表されます。

(1)
$$f_{\mathrm{Cf}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\mathrm{F}} \cdot C_{\mathrm{F2}}}}$$

フィルターインダクターは通常、入力フィルターの内最も高価な部品です。BOM コストを削減するために、10uH など低インダクタンスを選択することが可能です。フィルターインダクターで高い減衰能力を実現するには、フィルターコンデンサーの静電容量よりも小さい値のインダクタンスを持つインダクターを選択することをお勧めします。

インダクタンスが大きいほど、SRF は小さくなります。そのようなインダクタンスの自己共振周波数は約 30 MHz であるため、実際の設計では最大値で 10μH のフィルターインダクタンスが選択されます。

60～400 KHz の範囲の低いスイッチング周波数では、金属コアを使用したインダクタが適しています。 また、1MHz より高いスイッチング周波数では、フェライトコアインダクタが推奨されます。

フィルタインダクタの定格電流を超えると、巻線に損傷を与える可能性があります。 DC / DC コンバータの効率に影響を与えないように、直列抵抗(RDC)の小さいインダクタを推奨します。

© 2020 ROHM Co., Ltd.

DC / DC コンバータの実効入力電流 Iin は、式（2）を用いて計算できます。

(2) $$I_{\mathrm{in}} = \frac{V_{\mathrm{out}} \cdot I_{\mathrm{out}}}{V_{\mathrm{in}} \cdot \eta}$$

フィルターコイルの定格電流は入力電流よりも高くなければなりません。フィルターコンデンサ CF2 は式 3 で計算されます。

(3) $$C_{\mathrm{F2}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 0{,}1 \cdot f_{\mathrm{sw}})^2 \cdot L_{\mathrm{f}}}$$

価格と用途に応じて、MLCC または電解コンデンサのいずれかをフィルタコンデンサ CF2 として選択できます。電解コンデンサには、ESR が高いという利点があり、電源ラインの過渡電圧を減衰させるのに適しています。 MLCC は電解コンデンサよりも安価ですが、電圧に対して静電容量が低下します。

たとえば、図 6 は、150nF、50V 定格、X7R MLCC の電圧バイアス特性を示しています。

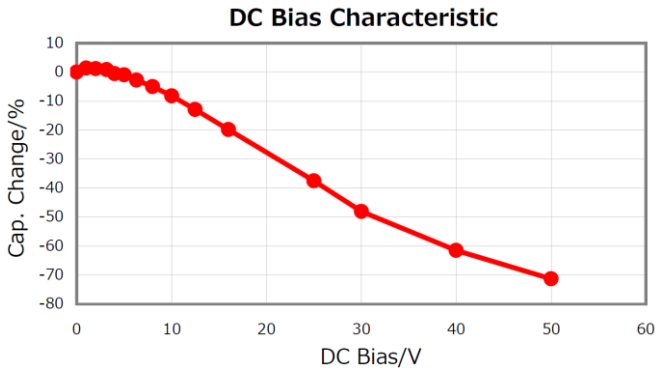

図 6：150 nF、定格 50V、X7R MLCC の電圧バイアス特性

MLCCの電圧バイアス特性に関しては、実際に印加される電圧で必要な静電容量を確保できるMLCCを選択する必要があります。一般的なガイドラインは、コンデンサで発生する最高電圧より2倍高いコンデンサ定格を選択することです。

フィルター減衰

入力フィルターは、DC/DC コンバーターの伝達関数にを影響を及ぼし、ループゲインを変化させる可能性があります。これは、DC / DC コンバーターの制御ループの安定性にとって重要な要素です。つまり、特定の条件下では、入力フィルターを追加すると制御ループが不安定になる可能性があります。図 7 に示すように、入力フィルターには Q 値と出力インピーダンスがあります。

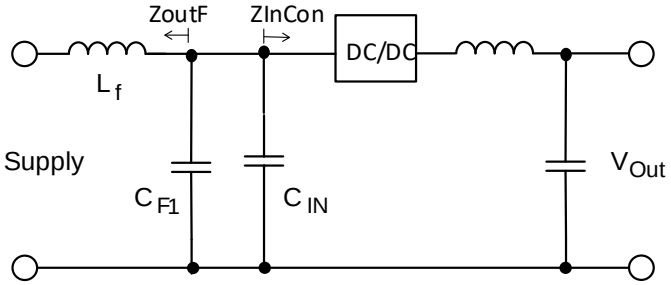

図 7：入力フィルターと *DC / DC* コンバーターのインピーダンス

入力フィルターの出力インピーダンス ZOutFがDC / DCコンバーターの入力インピーダンス ZInConと干渉するため、LC入力フィルターはDC/DCコンバーターの制御ループに影響を与えます。

LCフィルターは位相マージンを減少させ、過渡応答性能を低下させる場合があります。

入力フィルタのQ値が大きすぎると、DC / DCコンバータ入力の入力電圧が変化したときに発振が発生したり、制御ループが不安定になることがあります。

© 2020 ROHM Co., Ltd.

Q 値は式（4）で定義されます。

(4) $$Q = R_{\mathrm{d}} \cdot \sqrt{\frac{C_{\mathrm{f1}}}{L_{\mathrm{f}}}}$$

ここで適用される安定性の基準は、入力フィルターの出力インピーダンス ZoutF が DC / DC コンバーターの入力 Zin の入力インピーダンスよりも低くなければならないということです。

これは式（5）で説明されています。

(5) $$Z_{\mathrm{OutF}} \ll Z_{\mathrm{InCon}}$$

さらに、入力フィルターのコーナー周波数 f0F は、DC / DC コンバーターのクロスオーバー周波数 fCOCon よりもはるかに低くなければなりません。

(6) $$f_{\mathrm{0F}} \ll f_{\mathrm{COCon}}$$

図 8 に示すように、RC ネットワークをフィルターに追加すると、入力フィルターの Q が低下します。

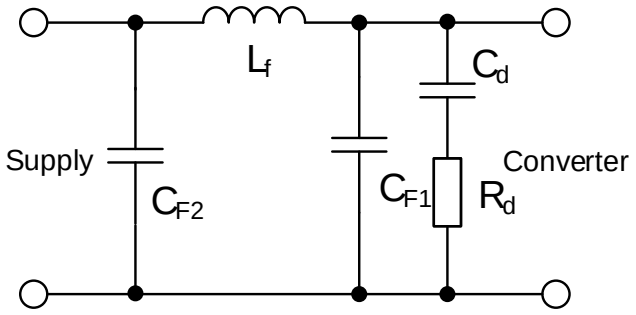

図 8：ダンピングネットワークを含む入力フィルター

抵抗器 R の目的はフィルターを減衰させることであり、直列のコンデンサーの目的は入力電圧の DC 部分をブロックして減衰抵抗器の損失を減らすことです。

式（7）を適用して、Qf = 1 のフィルターQ のダンピング抵抗 Rd を計算できます。

(7) $$R_{\mathrm{d}} = \sqrt{\frac{L_{\mathrm{f}}}{C_{\mathrm{f1}}}}$$

RC ネットワークのコンデンサ容量値 Cd は、フィルターコンデンサの静電容量 Cf1 の 5 倍から 10 倍の間で選択することができます。

(8) $$(5 \cdot C_{\mathrm{f1}}) < C_{\mathrm{d}} < (10 \cdot C_{\mathrm{f1}})$$

コストとスペースを考慮して、RC ネットワークの代わりにフィルター出力に並列に接続されている電解コンデンサーをフィルターとして使用し、減衰させることもできますが、電解コンデンサーの ESR の値は減衰するのに十分ではありません。

入力フィルターの位置

所望の特性を確保するために、入力フィルターは DC / DC コンバーターの入力にできるだけ近くに配置する必要があります。

基板の制約条件などにより入力フィルターが離れて配置されている場合、電力トレースが入力フィルターと DC / DC コンバーターの間の高周波アンテナとして機能する場合があります。これらの電力トレースには、筐体への容量結合があり、コモンモードノイズを引き起こし、それが放射性エミッションにつながります。

別の観点から見ると、電力トレースのインダクタンスは、図 8 に示されているセラミックコンデンサ CF2 と連動して LC フィルターとして機能します。電圧リップルを特定の低い値に低減し、伝導エミッションを抑制する働きをします。

© 2020 ROHM Co., Ltd.

結論

入力フィルターは、DC / DCコンバーターのEMCを最適化するために広く使用できますが、DC / DCコンバーターの制御ループに安定性の問題を引き起こさないように適切に設計する必要があります。

π型の入力フィルターを追加すると、DC / DCコンバーターの入力電圧リップルが減少するため、伝導エミッションを抑制できます。

入力フィルタの出力インピーダンスは、不安定性を回避するために、DC /DCコンバータの入力インピーダンスの値に合わせる必要があります。

入力フィルタのQ係数は、RCダンピングネットワークを使用することで低減できます。

By Stefan Klein, FAE, ATSC

Reference

1) Robert W. Erickson, and Maksimovic Dragan, Fundamentals of Power Electronics, Springer, 25. Mai 2012
2) R. D. Middlebrook, Null double injection and the extra element theorem, IEEE Trans. Educ., vol. 32, no. 3, pp. 167–180, Aug. 1998
3) Florian Hämmerle, Bode 100 - Application Note, Input Impedance & Filter Stability, OMICRON Lab, 2017
4) Capacitor characteristics from Specification of GCM series, Murata Manufacturing

© 2020 ROHM Co., Ltd.

ご 注 意

1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。

2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。

3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。

4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがいまして、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。

5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。

6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされておりません。

7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム

8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器

9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。

10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものですが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。

11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス･オフィスまでお問合せください。

12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。

13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。

ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

http://www.rohm.co.jp/contact/

© 2020 ROHM Co., Ltd.