

# —EMC のための設計テクニック—

## Part 3: フィルタとサージ防護素子

Eur Ing Keith Armstrong\*, C.Eng MIEE MIEEE

翻訳: 佐藤智典\*\*

これは、このジャーナルでこれから一年にわたって発表していく、電気 / 電子 / 機械ハードウェア設計におけるベスト・プラクティス EMC テクニックに関する 6 つの論文のシリーズの 3 番目のものである。このシリーズは、電源、シングル・ボード・コンピュータ、そしてモータ・ドライバなどのような「工業用コンポーネント」から、コンピュータ、オーディオ / ビデオ / TV、計測器などのようなスタンド・アロンの、あるいはネットワーク化された製品の設計者を想定したものである。

これらの 6 個の論文でカバーするテクニックは：

1. 回路設計 (デジタル、アナログ、スイッチ・モード、通信)、及びコンポーネントの選択
2. ケーブル、及びコネクタ
3. フィルタ、及びトランジェント・サプレッサ
4. シールド
5. PCB レイアウト (伝送線路を含む)
6. ESD、電気機械デバイス、及び力率補償

上のトピックのいずれについても 1 冊の教科書を書くことができる (そして多数書かれている) ので、このジャーナルの論文の形ではさまざまな論点を示し、ベスト・プラクティス・テクニックの最も重要な点を示す以上のことはできない。この論文で述べるテクニックの多くは、信号のインテグリティを向上させ、開発に際しての繰り返しを減らし、また製造コストを削減するためにも重要である。

### このパートの目次

- 3. フィルタとサージ防護素子
  - 3.1 フィルタの設計、選択、及び実装
  - 3.2 フィルタはどのように機能するか
  - 3.3 ソフト・フェライトの利点
  - 3.4 コモン・モード (CM) とディファレンシャル・モード (DM)

- 3.5 フィルタに関する粗雑な親指の法則
- 3.6 電流によるインダクタンス変化
- 3.7 フィルタの仕様の決定
- 3.8 現実世界のインピーダンスによる問題
- 3.9 接地漏洩電流、そして安全性
- 3.10 必要な信号の周波数、及び / もしくは感受性
- 3.11 フィルタのアース
- 3.12 フィルタと遮蔽の協同作業
- 3.13 フィルタの構造、取り付け、及び配線
- 3.14 サージ防護デバイス (SPD)
  - \* 3.14.1 SPD の種類
  - \* 3.14.2 データ線に SPD は必要か？
  - \* 3.14.3 SPD と信号インテグリティ
  - \* 3.14.4 SPD の定格
  - \* 3.14.5 SPD の過電流保護
  - \* 3.14.6 SPD の組み立て
  - \* 3.14.7 アース・リフトの問題

### 3. フィルタとサージ防護素子

フィルタは導体を伝搬する不要な周波数を減衰させるために用いられ、その特性は減衰率 対 周波数カーブによって示される。サージ防護素子は導体を伝搬する不要な電圧サージを減衰させ、その特性は電圧「let-through」対 時間グラフによって示される。

フィルタやサージ防護素子の誤った使用は、それらを全く使わない場合よりも製品のエミッションやイミュニティを悪化させることがある。より高価なフィルタやサージ防護素子が最良であるとは限らない。一般に、フィルタやサージ防護素子をその定格、回路数、そして想定されている用途のみをチェックして供給者のカタログから選択し、望んだ効果が得られると期待することはできない。

#### 3.1 フィルタの設計、選択、及び実装

フィルタの設計、及び / もしくは選択は黒魔術のように思えるかも知れない。そうではないが、たとえ

\* Cherry Clough Consultants, Associate of EMC-UK

\*\* URL: <http://member.nifty.ne.jp/tsato/>

ここで示した方針に従って最善の努力全てを行なったとしても、通常、最適なものを見つけるためには依然としていくつものフィルタを試すことが必要となる。

フィルタ設計について書かれた多くの本がある。私は、Arthur B. Williams の「Electronic Filter Design Handbook」(McGraw Hill, 1981, ISBN 0-07-070430-9) が非常に有用であると思っている。より現代的な版が入手できることに疑いはないが、フィルタ設計はこれらの年月のあいだに大きくは変わっていない。現在は、PC 上で動作するいくつものフィルタ・シミュレータもある。

この論文でフィルタ設計に踏み込むつもりはない—しかし、教科書やシミュレーション・プログラムを用いて設計され、あるいはカタログから選択されたフィルタに望んだ動作をさせる機会を与えるために考慮する必要がある点については説明する。

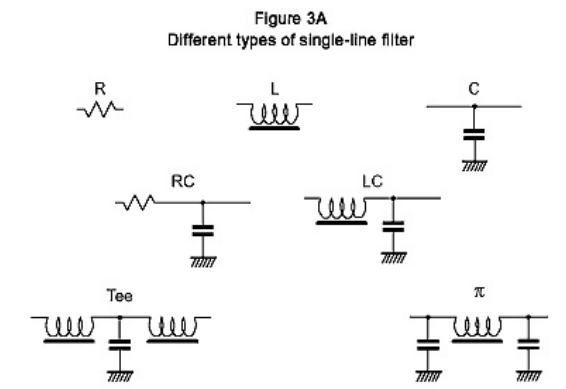
この論文では、製品とその外部環境との境界に取り付けられるフィルタについて議論する。製品内部で用いられるフィルタ、例えばスイッチング電源と敏感な回路とのあいだのものは、同一の配慮全てではないとしても、そのいくつかを共有するであろう。

### 3.2 フィルタはどのように機能するか

ある状況で良好に機能するフィルタもそれと異なった状況では貧弱なものとなり得るので、少なくともフィルタがどのように機能するかについての基本的な理解が必要となる。

フィルタは、導体を伝搬する信号に対してインピーダンスの不連続を作ることによって機能する。この不連続が大きくなれば減衰も大きくなる。従って、もし不要な信号のインピーダンスが  $100\Omega$  であり、それと直列に  $1k\Omega$  のインピーダンスを置いたならば、その信号の約 10% のみが高インピーダンスを通して流れる—約 20dB の減衰となる。同様の効果は、 $100\Omega$  の導体を低インピーダンスで分流することによっても得られる： $10\Omega$  は、約 20dB の減衰を与えるであろう。

EMC (低域通過) フィルタの種々の基本的なタイプを Figure 3A に示す。



単純な R のみ、あるいは L のみのフィルタは直列高インピーダンスを与え、不要な信号のインピーダンスが低い場合に良く用いられる。C のみのフィルタは分流低インピーダンスを与え、従って不要な信号のインピーダンスが高い場合に良く用いられる。C のみのフィルタのデータ・シートの図は、それがアースの RF での完全性 (全周波数範囲での理想的なゼロ・インピーダンス) に依存しているために現実世界ではあまり達成されず、実際にはそれは決して達成されない。

抵抗は、その浮遊分流量により、高周波では最終的にはその特性を失う。インダクタも浮遊分流量の影響を受け、これは自己共振を引き起こし、その高周波性能を制限する。EMC フィルタでの使用のための最良のインダクタは閉じた磁気回路を持つ (トロイドやシリンドラ、あるいはその他の形状でエア・ギャップを持たない) が、残念ながらこれはそれらが太電流での飽和効果 (後述する) の影響を受けやすくなることを意味する。

コンデンサは固有インダクタンスとリード・インダクタンスの影響を受け、自己共振を引き起こし、高周波性能を制限する。三端子コンデンサではインダクタンスの問題は少なくなる (その「アース」リードが非常に短い限り) もの、誘導効果の究極的な抑制は貫通コンデンサによってのみ達成され、これは素晴らしい高周波性能を持つ。伝統的な貫通コンデンサはシールド壁に半田付けされ、あるいはねじ込まれるが、現在ではある種の表面実装素子が PCB のグラウンド・プレーンへの半田付けによって同様の効果を与える。

強い共振を起こさないことから、全ての EMC フィルタの中で RC フィルタが最も予測しやすい。大きい R (例えば、 $1 \sim 10k\Omega$ ) と小さい C (例えば  $10nF$  以下) が最良である。RC フィルタの最も一般的な使用法は、低い信号源インピーダンスの直流や低周波の信号を高インピーダンス回路に入力する箇所 (R は信号源側に、C は回路側に接続される) であり、この用途では非常に高い減衰を最低のコストで確実に得ることができる。

LC、T、及び  $\pi$  フィルタでは、抵抗を用いたフィルタよりも低い損失で高い減衰を得られるものの、これらは共振回路であり、それが接続されるインピーダンスにより敏感となる。

抵抗を用いた T フィルタ (R-C-R) は、リボン・ケーブルやフレキシブル基板を通して高データ・レートをを用いる、コンピュータのマザーボードをディスプレイやその他の周辺装置に接続する箇所での使用が増えている。それらは実際には C のみのフィルタである—抵抗は信号のインテグリティを維持するためにそのコンデンサのそれぞれの側で伝送線路を終端するためのものである。抵抗は通常は  $22 \sim 100\Omega$  の範囲であり、このフィルタは通常は小型表面実装パッケージ内にアレイとして作り込まれる。

### 3.3 ソフト・フェライトの利点

LC、T、及び  $\pi$  フィルタはインダクタやコンデンサに内在する不完全性やそのリードの影響も受けるが、これは単純な計算（あるいはシミュレーション）と現実との食い違いの明らかな原因である。EMC フィルタのインダクタでのソフト・フェライトの使用は、これらの問題の軽減を助ける。

ソフト・フェライトは低周波ではインダクタであるが、高周波では高損失（抵抗性）になる。L のみのフィルタとして用いられた場合、ソフト・フェライトは、顕著な共振を起こすことなく、大抵は典型的なケーブルで 3~20dB の減衰を与える。より複雑なフィルタの中で用いられた場合、ソフト・フェライトは（ある種のシミュレータはその複雑なインピーダンス対周波数特性をモデル化できないかも知れないものの）より予測しやすい特性を与える。EMC のための標準的なソフト・フェライト材料は 1,000MHz においても依然として有効であり、最近のいくつかの素子はこれを 2GHz まで広げている。

極めて広い範囲のソフト・フェライト RF 抑制素子が存在しており、また追加され続けている——最近発表されたものには、100MHz 前後で  $1k\Omega$  以上を与える、 $0.1\Omega$  以下の直流抵抗を持つ、定格 3A の表面実装部品も含まれている。正しいソフト・フェライトを選択するためには、要求される抵抗性インピーダンスを、必要な周波数範囲についてそのインピーダンス対周波数グラフでチェックすることが必要である。真のソフト・フェライトはそのインピーダンス曲線に不連続性を持たない。

### 3.4 コモン・モード (CM) とディファレンシャル・モード (DM)

フィルタを効果的に使うためにはどの導体をフィルタ素子に接続するかを知る必要があり、従ってコモン・モードとディファレンシャル・モードの違いを知る必要がある。

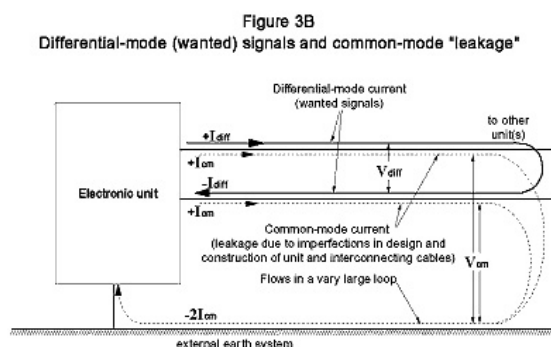


Figure 3B は必要な信号がほとんど常に DM であることを示している：電流は 1 つの所定の導体から

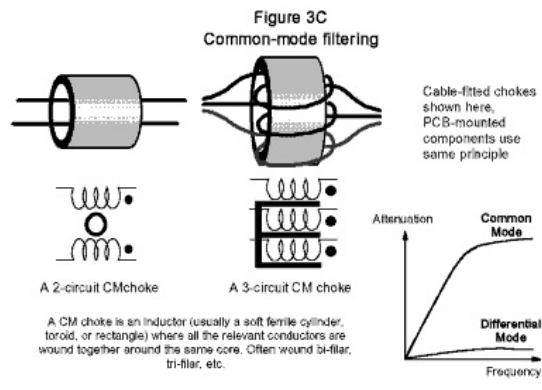
流れ出て他方に戻り、これらの 2 つの導体はその間に電圧を持つ。1 つの信号と電流還流経路全てのために 2 つよりも多い導体（例えば +5V、信号、0V；3 相交流電源）が必要となることもあるが、その原理は同じである。

一方、CM 電圧や電流はケーブル中の全ての導体（いかなる遮蔽も含む）で同一であり、全ての CM 電流は同一の方向に流れる。CM 電流の還流経路は外部の接地システム、他のケーブル、金属構造などを介したものである。CM 電流や電圧はしばしば非常に小さい振幅であるものの、その大きなループ面積は同等の DM 信号よりも悪い EMC 問題を引き起こす。

CM は、ほぼ例外なく必要な (DM) 信号の一部を CM に変換する設計と組み立ての不完全性によって引き起こされ、エミッション問題を引き起こす。これと同一の不完全性は、外部の CM 干渉の一部を DM 信号に変換し、信号雑音比、及び / もしくはデジタル信号インテグリティを悪化させ、イミュニティ問題を引き起こす。ケーブルは DM から CM への変換に大きく関与しており、この尺度はその「縦横変換損失 (longitudinal conversion loss; LCL)」と呼ばれる。

多くの現代的な製品で用いられている強力なデジタル集積回路 (IC) は、グランドや電源の「パウンズ」によって多量の内部高周波スイッチング雑音を発生する。これは全ての接続を介して IC から漏洩して PCB トラックに結合し、最終的には I/O やその他の全てのケーブルに CM ノイズとして現れる。このノイズは必要な信号に関する知識から期待されるよりもはるかに高い周波数成分と振幅を含んでおり、従って予測することが困難であり、通常は測定によって知る事ができるだけである。(1.1 章や第 5 部で説明するテクニックはこのノイズを顕著に低減させるであろう。)

磁気回路（フェライト・トロイドのような）が単一の導体の周囲に巻かれている場合、それはそれを流れる全ての電流——DM であれ CM であれ——を減衰させる。しかし、磁気回路が差動信号や電源回路として関係する送出導体と還流導体の双方（あるいは全て）の周囲に巻かれている場合には、それは CM 電流のみを減衰させる。DM 送出経路と還流経路によって生成される磁束は CM インダクタ内で打ち消し合い、従って（理想的には）それは必要な信号や電源には何も影響しない。現実には、常にいくらかの漏洩インダクタンスがあり、従って常に DM 電流のいくらかの減衰はあるが、これは CM フィルタと DM フィルタの双方を 1 つの素子で与えるために用いることができる。Figure 3C はコモン・モード・チョーク・フィルタのいくつかの局面を示す。

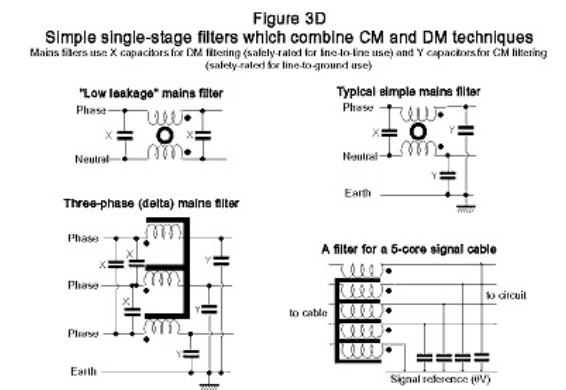


EMC のための大半のコモン・モード・チョークはソフト・フェライトから作られている。CM チョーク (しばしば、電流バランス・チョークと呼ばれる) 内での DM 磁束の打ち消しは小さな素子で大きなインダクタンス (mH の) を達成することを可能とするが、同一のサイズの DM チョークは  $\mu\text{H}$  程度であり、電流が増加するに従って物理的に大きくなる。

導体の組を同一の磁気回路の周囲に何回も巻き付けることは CM インピーダンスを増加させるが、浮遊容量がチョークを「短絡」させるので、高周波においては効果的ではない。極めて高い周波数でのより高い減衰のためには、いくつかのフェライト・チューブやトロイドを、それぞれに一度だけ通してケーブルに連ねた方がよい。(寄生容量が小さいことから、表面実装フェライト・ビーズは高周波で高いインピーダンスを達成することができる。)

便利なソフト・フェライト素子の 1 つは、縦に分割され、プラスチックの「クリップ式」ハウジングに保持されたシリンダーである。これは非常に容易にケーブルに取り付ける (そしてあまり働かないことがわかった時に取り除く) ことができ、リボン・ケーブルのためのフラット形のものも含め、広範囲の形状や大きさのものが入手可能である。全ての EMC 技術者はこれらをいくつも持ち歩いており、対策のためと同様、それらを EMC 問題の診断や切り分けのためにも用いている。

Figure 3D はコモン・モードやディファレンシャル・モードのフィルタリングが、様々な単純なフィルタにどのように組み込まれているかを示す。



### 3.5 フィルタに関する粗雑な親指の法則

ここで、フィルタに関する親指の法則を示すことができる：

- もし不要な信号が高インピーダンスの DM のものであれば、分流コンデンサ (送出導体と還流導体の間に接続される) を用いて減衰させる；
- もし不要な信号が低インピーダンスの DM のものであれば、直列インダクタ (良い高周波性能のためには同一のインダクタの対称な配置 — 1 つは送出導体の、1 つは還流導体の — が必要である) を用いて減衰させる；
- もし不要な信号が高インピーダンスの CM のものであれば、それぞれの導体から局所アース基準 (通常はシャーシ) への同一の分流コンデンサを用いて減衰させる；
- もし不要な信号が低インピーダンスの CM のものであれば、全ての信号導体に同時に適用されたコモン・モード・インダクタを用いて減衰させる。

「低い」、及び「高い」インピーダンスという用語があまり適切に定義されておらず、また必要な信号を取り扱うために使用可能な抑制素子のインピーダンスに (そしてその素子のコストや入手性、アース基準の品質やそれへの結合のしやすさなどにも) 依存するので、これらの規則は極めて粗雑なものである。

### 3.6 電流によるインダクタンス変化

全てのインダクタは、飽和 (インダクタンスが完全になくなる) に達するまで、電流が増加するとインダクタンスの減少を生じる。これは単純な計算やシミュレーションと現実世界でのフィルタの性能との違いの共通の原因の 1 つである。

親指の法則として、必要な電流が定格電流の 20% を超える場合にはこの影響を考慮すべきである。EN61000-3-2 に適合しない電源はその定格 RMS 電源電流の何倍も大きいピークの入力電流を吸い込むことも考慮すること。

### 3.7 フィルタの仕様の決定

エミッションの制御のために：必要なフィルタ性能は製品のエミッションのスペクトラムと適切な EMC 規格の限度値との比較によって決定することができる。エミッションは予測することも測定することもでき、また限度値は多くの場合は EN 55022 や EN 55011 と一致している。

イミュニティの制御のために：必要なフィルタ性能は意図した電磁環境の脅威の規定と保護すべき電子回路の感受性との比較によって決定することができる。許容された機能的性能の低下も考慮に入れるべきである。環境仕様は普通は EMC 規格、大抵は EN 50082-1 (望ましくは 1997 年版) や EN 50082-2 から取られる。しかし、EN 50082-2 でさえも、高レベルの 50Hz や無線周波 (RF) の電力が用いられ、あるいは製品を稼働させている時にユーザーがポータブル無線送信機を使うことを望む、ある種の工業、科学、あるいは医学的環境においては不適切かも知れない。

安全クリティカルなシステムが関係する場合には干渉事象に際しての機能低下は許されず、安全インテグリティ・レベルを (例えば新しい IEC 61508 を用いて) 規定し、必要なリスク水準を達成するためにそれに応じてイミュニティ試験レベルを上げるために用いるべきである。

これら全ては十分に体系化されているように聞こえるが、最大の費用効果のためには EMC はどのようなプロジェクトの開始から設計に入れられるべきである。我々は通常は何かを組み立ててそれを試験するまでは実際のエミッションや感受性を知らず、それではそのプロジェクトには遅すぎる。

これに対する回答は、全ての導体が何らかのフィルタリングを必要とすると仮定することである。しかし、我々は依然として知る必要がある：どの周波数の？そしてどの程度の？

残念ながら、実際のエミッションの多くは不要な CM 電圧や電流によって引き起こされている。イミュニティも同様である：我々は周波数範囲と脅威のレベルを規定することができるが、問題の多くは DM に変換されて信号を汚染する CM 干渉によって引き起こされている。DM から CM への、あるいは CM から DM への変換は不完全性によって引き起こされるので、我々は簡単にフィルタの仕様を予測することはできない。(このシリーズで議論される設計テクニックの多くはこの不完全性を減らし、従って DM/CM、及び CM/DM の変換を低減する。)

マーフィーの法則は、あなたが全てのことを考えたならばその高価なオプションが不要であったことが判明し、あなたが過剰設計に対して非難されるであろうことを保証する。しかし、あなたが何らかの可能性を見落としたならばマーフィーはそれを暴露し、あなたはそれについて非難されるであろう。我々は何をしても非難されるのであるから、初期設計にいくつかのフィルタの選択肢を含めることによって我々の人生を大いに容易にすることもできるであろう。

製品が最初に EMC 試験された際 (製造図面が作られるよりもかなり前) に、そのフィルタのいくつか / 全ては最初は短絡され、あるいは単純な高価でないフィルタが取り付けられるかも知れない。対マーフィー策は、次に、それらを素早く取り付けるためのツールとともに、広範囲の代替のフィルタと複雑な手作業とを必要とする。これは全ての EMC 技術者やテスト・ラボがフィルタ・メーカーからのサンプル・ボックスの山、溢れている工具箱、そして既に暖まっている半田銚や半田吸い取り器を持っている理由である。

幸い、様々な電子技術を様々な EMC 規格に適合させるようにフィルタリングする経験はすぐに得られ、大半の技術者は彼らの製品の中の異なった種類の導体のために普通はどのフィルタが最も良く機能するかをすぐに学ぶ。しかし、それぞれの新製品はその癖 (機構的なアセンブリにさえも影響される) を持っており、モデル 1 で機能したフィルタはモデル 2 には適切ではないものかも知れないことに注意せよ。従って、常に (少なくとも初期の試作品においては) あなたが使いたいと思っているものよりも高価で大きいフィルタを想定し、他の人全て (虚しい希望であるものの、ソフトウェアを含む) の設計が完了し、その製品が EMC 試験に適切なマージンを持って合格した時にのみこの保険を取り除くこと。

製品ごとに不可避な個体差があることを忘れないこと。従って、継続的に生産される製品においては、慎重な設計者はエミッション、及びイミュニティ試験で少なくとも 6dB の「工学的余裕」を目指すであろう。

### 3.8 現実世界のインピーダンスによる問題

ほとんどのフィルタ・データは 50Ω の信号源、及び負荷インピーダンスで行われた試験によるものであり、これは我々を極めて重要な点に導く— フィルタの仕様はその現実世界での性能と比較して常に救い難く楽観的である。

電子機器の直流電源装置への AC 電源インレットに組み込まれた典型的な電源フィルタについて検討してみよう。AC 電源の CM、及び DM インピーダンスは、それに接続されている負荷や注目している周波数に依存して、1 日のあいだに 2Ω から 2,000Ω まで変動することがある。AC-DC 変換回路の DM インピーダンスは波形のピークで整流器が導通している時には短絡のように見えるが、それ以外の時には開放のように見える。直流電源装置の AC 入力 CM インピーダンスは、安全上の理由によるアースからの絶縁のため非常に高い (これが大半の主電源フィルタがラインからアースへの Y

コンデンサを主電源フィルタの装置側に接続している理由である：その最大インピーダンスと不連続とするため)。これは、整合した  $50\Omega / 50\Omega$  の状況とは明らかに大きく異なっている。

フィルタはインダクタとコンデンサから作られているので、それは共振回路であり、その性能と共振性はその信号源や負荷のインピーダンスに強く依存することがある。実際には、素晴らしい  $50 / 50\Omega$  性能を持った高価なフィルタが、平凡な  $50 / 50\Omega$  性能の安価なフィルタよりも劣った実力を示すこともあり得る。

単一ステージのフィルタ (Figure 3D で示したような) は、信号源や負荷のインピーダンスに極めて敏感である。そのようなフィルタは、 $50\Omega$  以外の信号源、あるいは負荷インピーダンスで使用された場合には、容易に減衰の代わりにゲインを生じる。このフィルタ・ゲインは通常は  $150\text{kHz}$  から  $10\text{MHz}$  の範囲に生じ、 $10 \sim 20\text{dB}$  程度悪いものとなることがあり、従って不適切な主電源フィルタの取り付けはエミッションを増加させ、かつ / あるいはイミュニティを悪化させることがある。

Figure 3E  
Examples of 2-stage mains filters

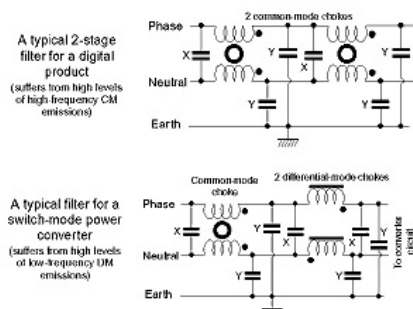
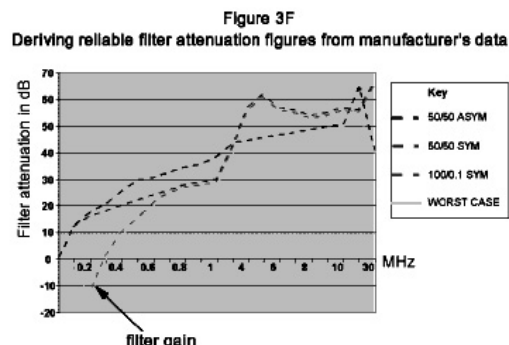


Figure 3E に示すような、2 段、あるいはそれ以上のステージを持つフィルタは内部の回路ノードを信号源や負荷のインピーダンスにそれほど強くは依存しないように保ち、従ってその  $50 / 50\Omega$  仕様とある程度は近い性能を提供する。勿論、それらはより大きく、また高価になる。

信号源 / 負荷インピーダンスの問題に対処する最良の方法は、その製造業者が CM (しばしば「非対称」と呼ばれる) と DM (しばしば「対称」と呼ばれる) 性能の双方を、整合した  $50 / 50\Omega$  と不整合の信号源や負荷の双方について規定しているフィルタのみを購入することである。不整合での特性は、 $0.1\Omega$  の信号源と  $100\Omega$  の負荷、及びその逆について、 $50 / 50\Omega$  試験においても用いられる CISPR17 試験規格を用いて得ることができる。フィルタが電流で過負荷とならず (上で議論したように)、かつ適切にアースされている (以下で議論するように) という条件で、関係があるかも知れないフィルタの

仕様に含まれる異なった曲線全ての最悪条件を組み合わせる。このフィルタ曲線の最悪値の抽出の例を Figure 3F に示す。



### 3.9 接地漏洩電流、そして安全性

ほとんどの電源フィルタは、対応する安全規格の接地漏洩電流限度を超えないように、相とアースのあいだに数  $\text{nF}$  程度の Y 定格のコンデンサを用いている。恒久的に接続された固定型機器では、いくつかの条件のもとでは (適切な警告ラベルが取り付けられている場合)、相電流の 5% までの、より大きい接地漏洩電流が許されている。工業用電力変換装置は極めて高いレベルのエミッションを持つことがあり、しばしば大きなフィルタ・コンデンサを、従って大きな接地漏洩電流を必要とする。これは EMC と安全の配慮が不可避に絡み合う領域の 1 つであり、勿論安全が勝つので、主電源フィルタの設計に際しては、大半のフィルタ・コンデンサは  $\pm 20\%$  の許容差を持つことを忘れずに、常に対応する安全規格を参照しなければならない。

患者に接続されることのある医用機器においては、その安全規格によって、接地漏洩電流がどのような合理的な大きさの Y コンデンサも使用できないほど低いレベルに制限されていることがある。そのようなフィルタは、Y コンデンサを用いずに同じ性能を達成するために、より良い CM チョーク、及び / もしくはより多くのステージを用いる傾向があり、従ってより大きく、より高価なものとなる傾向がある。

システムにおいては、いくつかの Y コンデンサ (小さいものであっても) からの接地漏洩電流が大きな接地電流を生じることがある。これらは異なった機器のあいだのケーブルにハムや高レベルのトランジェントを乗せる接地電位差を引き起こすことがある。現代的なベスト EMC プラクティスは等電位 3 次元格子接地接続を必要とするが、多くの古い設備はこれを持っておらず、従って古い建物の中のシステムを意図した装置では低漏洩フィルタを用いる価値があるかも知れない。

独立した機関の安全性確認証明書が入手できており、その信憑性、フィルタの型式と変種、温度範囲、電圧と電流の定格、そして正しい安全規格の適用を確認した主電源フィルタ（あるいは素子）を使用することが常に最良である。

50/60Hz での使用のために販売されているフィルタは、一般に直流から 400Hz の範囲の電源で同じ性能で使うことができるかも知れないが、事前に製造業者に確認することが最良である。また、電源周波数が高くなると接地漏洩電流は増加するので、50Hz においてのみ安全規格に適合するフィルタは 60Hz ではそれに適合しないかも知れず、そして 400Hz では明らかに危険となるかも知れないことを忘れないこと。

### 3.10 必要な信号の周波数、及び / もしくは感受性

ほとんどの EMC フィルタは低域通過である。電源フィルタにはそれなりの設計上の困難があるが、必要な信号（直流、もしくは 50/60Hz）が大半の干渉の周波数よりも大幅に低いという利点がある。信号がデジタルや高レベルのアナログであり、非常に高い周波数ではないか非常に敏感ではないならば、しばしば Figure 3A に示したような単純な R、L、C、RC、LC、T、あるいは フィルタが用いられる。

しかし、エミッション / イミュニティ周波数が必要な信号と重なっている、あるいはそれに近い場合には、Figure 3A のような DM フィルタを取り付けることは良くない— 不要な信号をフィルタリングすると干渉は削減されるが、これは必要な信号も削減するであろう。フィルタリングの代わり、あるいはそれと同時に、遮蔽付きのケーブルやコネクタが必要となるであろう。

極めて高価な（太くて柔軟性のない）ケーブルを用いたとしても、高データ・レートではシングル・エンド信号は EMC に大きな困難をもたらす得る。平衡配線とともに平衡駆動 / 受信回路を使用する（1.4 章で議論した）ことは高レート信号のフィルタリングと遮蔽をはるかに容易にし、ケーブルのコスト（そして太さ）を減らし、そして EMC 適合をはるかに容易にする。そして、必要な信号のスペクトラム内で、DM フィルタではなく CM フィルタが用いられるかも知れない。これは、たとえば機能回路の部品コストが最小とはならないとしてもプロジェクト全体の時間と製造コストを最小とする、初期設計段階での良い考慮の例である。それらを EMC 適合とすべき時が来た時に、あるいはシステムでの干渉問題を解決するために多大なコストと遅延を招く、チープな機能回路設計の例は多い。

低周波の計装、オーディオ、そしてその他の敏感なアナログ信号は、導体の全長にわたって適切な遮蔽

が行われていない場合には、必要なイミュニティを達成するために多段のフィルタを必要とするかも知れない。（残念ながら、依然としてケーブル・シールドが片端でのみアースに接続されるべきであると考えている産業界においては良い RF 遮蔽は「伝統的」なものではない— 2.6.6 章を見よ。）

電子モジュールが敏感な入力を持つ場合、（その敏感な内部回路がその回路の他の部分から内部フィルタリングや遮蔽によって適切に保護されていない限り— 第 5 部を見よ）しばしばその入力、出力、そして電源導体の全てに高性能フィルタが必要となる。

### 3.11 フィルタのアース

アースに接続されるコンデンサを用いている RF フィルタの秘密の 1 つは、それが接続される基準（ほとんど常にアース、もしくは 0V）の RF 性能よりも大幅に良くなることは決していないということである。家庭、商業、あるいは工業施設のアースの大半は劣悪な RF 性能を持ち、理想的な「無限 RF シンク」とは全く似ていない。

この論文の目的のためのフィルタを取り付ける最良の場所は、製品の「内部世界」と「外部世界」にあるケーブルとの境界である。遮蔽付きエンクロージャにおいては、可能であればバルクヘッド貫通型のフィルタを用いて、フィルタを外部の面に RF 接続（すなわち金属と金属の）すべきである。遮蔽なしエンクロージャにおいては、通常はフィルタは PCB の一端でプリント配線板のグランド・プレーンに接続することが最良である。

フィルタ内のコンデンサと RF 基準として用いられる何かとの接続は、非常に短く直接的な、減衰させるべき最大の周波数の波長の  $1/100$  以下のものとすべきであり、また非常に低いインダクタンスを持つべきである。これは、たとえそれが緑 / 黄の絶縁を持っていたとしても（電気は色盲である）、低周波（例えば 1MHz 以下）を除いてはフィルタ・グランドとしてワイヤを用いることはできないことを意味する。例えば、もし 2.2nF の Y コンデンサを持つ電源フィルタが長さ 100mm のワイヤだけでアースされているならば、そのワイヤのインダクタンスによってその Y コンデンサは 20MHz 以上の周波数では完全に役に立たなくなるであろう。

1mm 当たり 1nH というのは、アースへのワイヤ接続の影響を計算する際の良い親指の法則である。フィルタの唯一の正しい接続は、少なくとも 1 点（できればより多く）での、フィルタの金属ボディーとアース基準との金属と金属の直接の接触である。少なくとも 1 つの良い RF アース接続と併用している限り、安全上の理由からフィルタに緑 / 黄のワイヤを取り付けることは許容できる。



明らかに、大半の伝統的な軍事用機器は堅固な良く設計された RF アース基準 (金属のボディーの機械や乗物の金属の仕切りにしっかりとボルト止めされたダイキャスト anodized ボックス) を持ち、アースされたコンデンサが劣悪な RF アース・インテグリティの影響を受けないことから、軍事用信号フィルタは C のみのものや  $\pi$  型のものに頼る傾向がある。

残念ながら、低コストを意識して構築される家庭、商業、そして産業用製品においては、RF アース・インテグリティはしばしば深刻な問題となる。これらの用途で最も予測しやすいフィルタは、RC、LC、あるいは T 型のもの (L 素子にソフト・フェライトが用いられた) となる傾向がある。これらは C のみの、あるいは  $\pi$  型のフィルタよりも低いレベルの RF 電流をアース基準に注入する。軍用車がカーボン・ファイバーのような新素材を用いるようになるとそのアース基準が効果的ではないものとなり、R、L、RC、LC、及び T 型のフィルタが C や  $\pi$  よりも費用効果が高いことに気付くかも知れない。

広範囲のフィルタと遮蔽のオプションを持つ D 型やその他のいくつかの種類のコネクタが入手可能であり、適用が非常に容易であるので、それらによる事後の EMC 改善は低電流の信号ケーブルのためには良い選択である。それらの多くはそれぞれの信号 / 電源ピンからアースされた金属ボディーへのコンデンサを用いている。それぞれのピンの周囲にソフト・フェライト・チューブを取り付けた D 型コネクタ、そしてそれぞれのピンに LC、T、あるいは  $\pi$  型のフィルタを取り付けたものでさえ入手可能である。ピン・フィルタは CM 電流と DM 電流を同等に扱うので、必要な信号が高周波のものである場合には適切ではない。

電話や Ethernet で用いられている RJ45 や類似のコネクタは、組み込みのコモン・モード・チョークを持つものが入手可能である。低周波コモン・モード・ノイズを除去し、かつ / あるいは電気的絶縁を与えるために高速 LAN でしばしば用いられるバルンやパルス・トランスは、しばしば高周波ノイズのより良い除去のためにコモン・モード・チョークと組み合わせた形で入手することができる。

### 3.12 フィルタと遮蔽の協同作業

電源フィルタが非常に高い周波数 (例えばデジタル処理回路からの高調波である 300MHz) が製品の主電源コードに通過することを許すならば、そのコードからのその周波数の放射は製品の放射エミッションを悪化させるであろう。

費用効果の良い EMC のためのもう 1 つの秘密は、フィルタリングと遮蔽とを、それぞれが他方を補完

する協同作業として見るのが正しいというものである。フィルタ設計や取り付けの誤ったテクニックは放射性のエミッションやイミュニティを容易に悪化させ得る。同様に、不適切な遮蔽は伝導性のエミッションやイミュニティを容易に悪化させ得る。

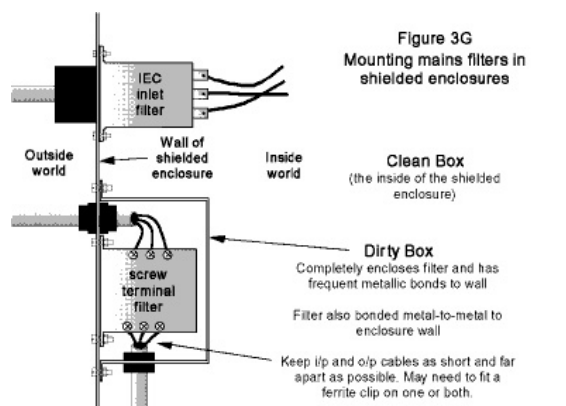
いくつかの製造業者は、コストを低く抑えるために、フィルタを伝導性エミッション試験の周波数範囲内 (30MHz まで) で機能するようにしているだけである。残念ながら、そのようなフィルタはしばしば遮蔽付きエンクロージャの遮蔽の完全性を損ない、放射電磁界妨害に関する問題を引き起こす。

### 3.13 フィルタの構造、取り付け、及び配線

フィルタは、フィルタされていない側の導体とフィルタされた側の導体との RF 結合によって容易に台無しにされる。多くの技術者は高周波が容易にフィルタを「すり抜ける」ことに非常に驚かされる。

フィルタすべき外部ケーブルが遮蔽されたエンクロージャや部屋に入る箇所では、フィルタはケーブルの入口の金属の壁に取り付けられ、壁の金属材に RF 結合 (金属と金属の) されなければならない。高周波でのより良い性能のために、そしてエンクロージャ・シールドを損なうことを避けるために、フィルタの金属ボディーと壁との低インピーダンスの電氣的結合を達成するためにフィルタの断面全周に導電性ガasketやスプリング・フィンガーを取り付けることもできる。

遮蔽されたエンクロージャに組み込まれた IEC インレット・フィルタは、そのボディーが継目無しの構造を持っており、かつそのボディーが Figure 3G に示すように遮蔽金属材に RF 接続されている場合にのみ、数十 MHz よりも上の周波数で良い性能を持つことができる。



バルクヘッド貫通フィルタが最良であるが、10A を超える主電源電流 (IEC 320 スタイルの主電源用コネクタの最大定格) のように、用途によっては高価過ぎるものとなるかも知れない。市場で入手できる高電力用の主電源フィルタの大半はネジ止め式



端子接続を持った単なる直方体のユニットである。Figure 3G は、良好な高周波性能の達成を助けるために、そのようなフィルタをメインの遮蔽エンクロージャ（「クリーン・ボックス」）の内側の専用の箱で囲む「ダーティー・ボックス」手法を用いて実装する方法を示している。

ダーティー・ボックス内のフィルタの入力と出力のケーブルは非常に短く、互いに遠く離れていなければならないが、そうしてさえも非常に高い周波数は依然としてそれらのあいだで結合することができるので、いずれかの（あるいは双方の）ケーブルにソフト・フェライト・シリンダーを付ける必要があるかも知れない。

バルクヘッド貫通型ではないが、最高の性能を持たなければならないフィルタは、しばしばその入力と出力の端子をそれぞれの金属エンクロージャ（「ダーティー・ボックス」）で囲み、それらのケーブルを標準的な円筒型の導電処理されたコンジット・フィッティングを通して出すことによって対処している。ケーブルをコンジットに通すことはフィルタされていないものをフィルタされたケーブルから効果的に遮蔽し、フィルタはその最高の周波数まで効果的に機能する。これは EMC テスト・チャンバでの使用を意図した大半の電源フィルタで用いられている手法である。同じ効果を得るために、入力と出力のケーブルをコンジットに通す代わりに遮蔽しても良い。

### 3.14 サージ防護デバイス (SPD)

#### 3.14.1 SPD の種類

サージ・アレスタは、その抵抗が印加電圧の関数となる可変抵抗デバイスである。それらは、ツェナー・ダイオードのように、その両端の電圧が所定のレベルを超えた際にクランプ効果を与えるように設計されている。

基本的な種類の SPD は：

- ガス放電管：本質的には単なるスパーク・ギャップであり、低速だが極めて高電力
- 酸化金属バリスタ：高速で、広範囲のエネルギー定格のものが入手可能
- アバランシェ素子：ツェナー型の動作を行なう半導体であり、極めて高速であるがあまり高電力は扱えない
- SCR デバイス：別の種類の半導体デバイスであり、低速であるが高電流を扱える

Figure 3H  
Typical performance of the four main types of SPD  
(ignoring the effects of inductance in their wiring or earth bonding)

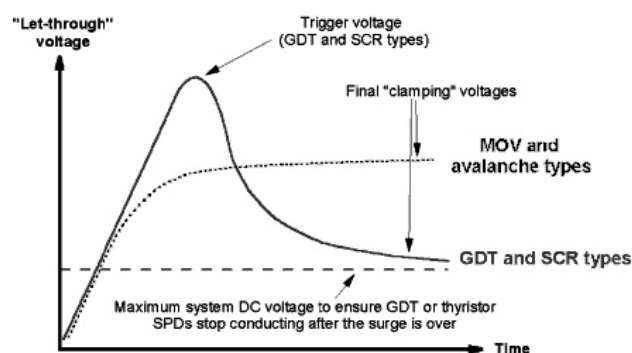


Figure 3H はこれらの 4 種類の SPD が典型的なサージ試験波形に曝された際の電圧 / 時間カーブを示す。これはガス放電管と SCR デバイスの抑制の開始が遅いことを示している。それらは導通を始めるまえにトリガ電圧に達しなければならず、この時間のあいだは損傷を与える可能性のあるサージ電圧を通過させる。それらは折り返し特性も持ち、これはそれが一度トリガされて電流を流すようになるとその両端の電圧がそれ以前にブロックしていた電圧よりもかなり低く低下することを意味する。従って、それが DC 電流源に接続された場合に恒久的に導通したままとならないことを保証するために、慎重な設計が必要となる。

酸化金属バリスタとアバランシェ素子は、電流を流し始める電圧を持つツェナー・ダイオードのように動作する。電流が増加すると、クランプ電圧は緩やかに上昇する。

通常主電源の抑制に用いられている SPD は、大きすぎる漏洩電流、大きすぎる静電容量、インピーダンスの不整合、あるいはその他の様々な問題のため、信号やデータ線のためには不適切であるかも知れない。バルクヘッド貫通フィルタのように、様々なデジタルやアナログの信号ケーブルに直接接続して接地された金属構造に取り付けることを意図した、コネクタの取り付けられた特別な SPD が入手可能である。無線アンテナや高速データ線は、BNC のようなコネクタを用いた、整合伝送線路型の SPD を用いる。

#### 3.14.2 データ線に SPD は必要か？

しばしば SPD をデータ線で用いるように宣伝されることがあるが、それが建物内に限られている場合には、これは実際にはその両端の機器のあいだに落雷サージが高電圧を引き起こせるような貧弱な接地構造がある場合の長いケーブルにのみ必要となる。製品のケーブルが建物の外に出る（あるいは外部のアンテナに接続される）場合には、それには常にサージ防護デバイスを取り付けるべきである。

短い相互接続 (例えば、キーボードやプリンタと PC のあいだの) においては接地電位差や高速トランジェント・バーストの問題は存在せず、SPD のために残されたものは静電気放電 (ESD) トランジェントだけである。ESD は、放電を完全に防止するためのプラスチックか、さもなければ良好な接地接続を持つ金属構造を用いて最も良く対処できるという点については、第 6 部を参照されたい。

### 3.14.3 SPD と信号インテグリティ

アナログやデジタルのデータのサージ保護は、それだけでは完了しない。サージが損傷を引き起こさないとしても、誤った値やビットをもたらすであろう。単純なアナログ指示計器のようにメモリやプログラムが関係しない場合には (機能に依存するものの) 読み取りの一時的なグリッチは許容されるが、ある種のアナログ信号や全てのデジタル・データ (制御信号のような) においては一時的な誤った信号が記録されたデータや動作状態を変化させることがあり、これは通常は許容されない。非常に低速のデータには「スパイク」を検知レベル以下に低減するためのフィルタを使用できることがある。

データのグリッチが許容できず、サージからの唯一の保護が SPD の使用である場合には、誤ったデータを検出して回復するための何らかの手段が必要となる。1.4.7 で簡単に説明したような通信プロトコルは普通の回答である。単純なものからエキゾチックなものまでにわたる、その全てが様々なオーバーヘッドとペナルティを持つ多数のものがあり、最もコスト的に厳しい大量生産の応用においてさえも、十分に良い自分自身のプロトコルを作れると思わずに現実世界の応用で頑丈さが証明されたプロトコル (例えば CAN) を実現するチップを購入することが最良である。

### 3.14.4 SPD の定格

SPD 定格は実際には建物とその落雷防護ネットワークの設計を考慮に入れて選択すべきである。BS6651 Appendix C はこの点を扱っており、建物の異なった部分に取り付けられる機器のための SPD 定格を規定している。

共通 EMC 規格や製品群 EMC 規格がサージ防護に触れていない場合や、そのサージ要求が不完全である場合 (例えば、EN50082-1:1992 や EN50082-2:1995 はサージ要求を全く持たず、EN50082-1:1997 は主電源と直流電源ポートに対してのみサージ要求を与える) には、この規格や、電子機器の落雷防護を扱うその他のもの (例えば IEEE C62.41-1991) を用いるべきである。

BS6651 Appendix C は建物の主電源引き込み接続から 20m 以降 (カテゴリー A として知られる、最も穏やかな位置) に配置される機器の主電源に対して以下の SPD 定格を規定している：

- 低リスク環境：2kV, 167A
- 中リスク環境：4kV, 333A
- 高リスク環境：6kV, 500A

大半の住宅を含む、カテゴリー A となるほど大きくない建物は、その内部に接続される機器のためにはカテゴリー B と規定される：

- 低リスク環境：2kV, 1,000A
- 中リスク環境：4kV, 2,000A
- 高リスク環境：6kV, 3,000A

電話線やその他の信号 / データ・ケーブル (建物の中をどれだけ引かれているかとは無関係に)、そして建物の外に取り付けられる機器への主電源はカテゴリー C として知られている：

- 低リスク環境：6kV, 3,000A
- 中リスク環境：10kV, 5,000A
- 高リスク環境：20kV, 10,000A

製品が落雷サージに対して適切に保護されている場合には、一般にそれは他の原因によって発生する一般的なサージに対しても十分に保護されている。用途がわかっているか、あるいは落雷に起因しない高レベルのサージによる被害が疑われる場合には、落雷防護規格によって要求されるものよりも 1 つ上のレベルに対して製品を保護すれば一般には充分である。

ある種の超電導磁石、発電設備、あるいは核爆発電磁パルス (NEMP) は、極度の、あるいは特別な種類のサージをもたらすことがあり、これにはここでは触れない。

### 3.14.5 SPD の過電流保護

全ての SPD は最終的には故障するし、大半の製品は主電源入力に酸化金属バリスタ (その故障モードは漏洩の増加であり、最終的には短絡となる) を用いているので、火災や感電事故を防止するためにヒューズを付ける必要があるかも知れない。

もしヒューズがその SPD 回路にのみ入れられているならば、サージ事象に際してそれが開放した際には SPD は切り離され、それによって保護されていた機器はサージの残りに曝されて損傷を受ける。

たとえその保護された機器が損傷を受けていなかったとしても、それは既にサージ防護を失っており、従ってそれ以降の別のサージに強く曝されることになる。

もしヒューズが保護された機器へも行く線に直列に挿入されているならば、SPD の故障によるヒューズの開放は機器をその線から切断するが、これはクリティカルな用途では許容されないことがある。

SPD の過電流保護問題に対する簡単な回答はないが、その SPD が受けることが想定される最大の回数のサージに対して適切な定格を持つ限り、通常は上の方法のいずれかを受け入れられる。長期的な信頼性を期待できるように落雷によって引き起こされるサージの回数や強度の評価を可能とする、地域や用途に応じたリスク・アセスメントとともに、我々を助けるために落雷防護規格が用意されている。

### 3.14.6 SPD の組み立て

フィルタと同様、SPD は不要な DM や CM の信号を抑制するために用いることができる。サージ・コミュニティで一般的なジャーゴンでは、通常 DM サージはライン ライン間 (あるいは対称)、CM サージはライン 接地間 (あるいは非対称) と呼ばれる。

SPD は、サージ電圧を「短絡」するために、常に分流モードで用いられる。また、フィルタと同様、SPD は正しく組み立てられた場合にのみ期待したように機能する。最も重要な点の1つは、リード・インダクタンスを避けることである。

サージ電流がリード・インダクタンスを流れると、それは「let-through」電圧を増加させる電圧を発生する。Figure 3J に示すように、引き込まれた電源 (あるいは信号) を SPD の端子に直接引き回し (あるいは配線し)、そして保護された回路もその SPD の端子に接続することが最良である。

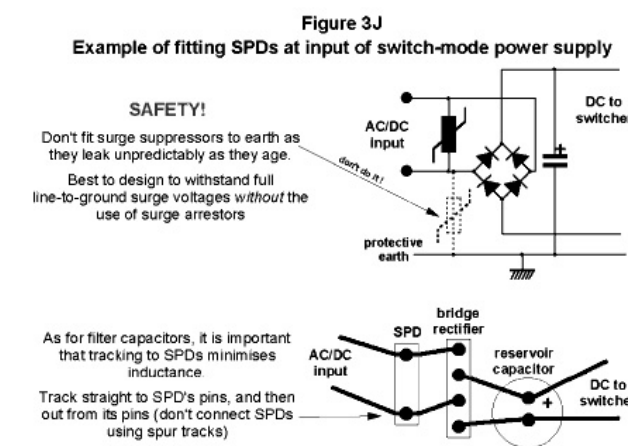


Figure 3J は、SPD が劣化した際の予期できない接地漏洩電流とその結果としての安全に関する問

題のため、可搬型やプラグ接続型の機器においては相と接地のあいだの SPD の使用は (もし禁止されていないならば) 強く思いとどまるべきであることも示している。従って、ライン 接地間 (コモン・モード) サージに対処するためには他の手法を用いることが最良である。

しかし、電源の相と接地のあいだの SPD は、恒久的に接続された機器においては、特にそれがその一方が故障した場合でももう一方がいかなる SPD 接地漏洩による感電も防止するように二重化された接地導体を持つならば許容できることがある。建物内の機器の落雷サージからの保護を助けるために、屋内配線においては大抵は SPD は相と接地のあいだに接続されている (例えば、BS6651 Appendix C を見よ) が、安全のためには、そのような場合には建物の接地構造 (その共通接続ネットワーク) は高度の冗長性を持ち、いかなる単一の導体にも依存しないべきである。

保護される回路と直列にして用いられる、他の種類のサージ制限部品がある。異なった種類のもは、スイッチの投入の際のサージ電流のエミッションを防止し、あるいは回路を電源からの電流サージから保護するために用いられる。これらはここでは議論しない。

### 3.14.7 アース・リフトの問題

恒久的に接続される固定型製品において相と保護接地のあいだに SPD を取り付けることは、適切な保護接地が与えられるならば対応する安全規格によって許容されるかも知れない。しかし、これはその保護接地導体のインダクタンスによる新たな問題を生ずることがある。通常の保護導線は  $1\mu\text{H}/\text{m}$  程度のインダクタンスを持ち、 $1\text{kA}$  程度の落雷サージ電流は  $1\mu\text{s}$  程度の立ち上がり時間を持つ—電源サージを接地ワイヤに接続された SPD で抑制しようとすることは、実際にはサージの始まりを抑制しない。その代わりに、電源導体上のサージ電圧の最初の数マイクロ秒、接地ワイヤ (そして製品のシャーシ) の電圧がそれに追従するようにさせる。(少なくとも) 航空電子工学の世界ではこの現象は「アース・リフト」と呼ばれており、これはそれをうまく要約している。

これは主電源入力自身を保護するが、その製品に接続された信号ケーブルがある場合には、今度は接地されたシャーシに現れたサージ電圧は信号ケーブルを主電源サージの頭の部分に曝し、これは関係する回路に損傷を与えることがある (大半のフォトカプラは  $500\text{V}$  の定格しか持たないので、たとえ光絶縁されていたとしても)。従って、ライン 接地間サージからの保護のために主電源入力に SPD が取

り付けられている場合には、全ての信号ケーブルもサージ保護を必要とするかも知れない。

同じ問題は、外部への電話線や LAN が機器の保護接地やシャーシに接続された SPD によって保護されている場合にも生じる。これは信号ケーブル上のサージがその製品の電源に損傷を与えられるようにすることがあり、主電源にも SPD を使用する（あるいは、十分なライン 接地間絶縁電圧によって必要な保護を達成する）ことを必要とする。

コンピュータや通信機器のキャビネットは、しばしばその金属キャビネットをそれぞれが 500mm 以内の長さの 1 つ以上の高電流用ケーブルで建物の共通接続ネットワークに直接接続することによって「アース・リフト」サージに対処している。それらのあいだで信号をやりとりする、いくつかのキャビネットの「システム・ブロック」があるならば、現代的なグッド・プラクティスはそれらのキャビネットのあいだでの接地インダクタンスを低減するために局所的な接地メッシュを構成することである。これは設備のコストに加わるが、引き込まれた主電源や外部 LAN や電話線に SPD が取り付けられた際の、全ての内部通信 I/O に対するヘビー・デューティな SPD の必要性をなくす。明らかに、この接地と接合のテクニックは、家庭用の、あるいは可搬型の装置には適当ではない。

---

Copyright (C) 1999 Nutwood UK Ltd.

これは、Keith Armstrong 氏が UK EMC Journal 上で発表した文書を、その許諾を得て T. Sato が翻訳したものです。この翻訳については、原著者らはいかなる責任も持ちません。これについての意見、質問などは VEF00200@nifty.ne.jp (T.Sato) 宛にお送り下さい。

Last update: March 11, 2000