

IEC 61000-4-16 の概要 — 低周波伝導コモンモード妨害 イミュニティ試験の方法

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2025 年 10 月 22 日

目次

1	概要	1
1.1	背景	1
2	使用機器	2
2.1	試験発生器	2
2.1.1	主な特性	2
2.1.2	試験発生器の構成	2
2.1.3	試験発生器の検証	2
2.2	結合回路網	3
2.2.1	電源ポート、及び入出力ポート	3
2.2.2	平衡通信ポート	4
2.2.3	シールド線	4
2.3	減結合デバイス	4
2.3.1	代替手段	5
3	試験	6
3.1	試験セットアップ	6
3.2	試験の実施	7
4	補足	7
4.1	結合回路の接続の EUT の動作への影響	7
4.2	ライン上の電圧の試験への影響	10
4.3	ケーブルのシールドの効果	10
4.4	妨害の発生と結合	11
4.4.1	妨害の発生源の例	11
4.4.2	妨害の結合のメカニズムの例	11
4.4.2.1	ケーブル間の誘導結合	11
4.4.2.2	接地電位差	12
5	参考資料	13

1 概要

IEC 61000-4-16 は IEC 61000-4-6^[2] で扱われるものよりも低い周波数範囲のコモンモード妨害に対するイミュニティ試験の方法を定めた規格であり、0~150 kHz の周波数範囲がカバーされる。

本稿では、この規格の本稿の執筆の時点での最新版である IEC 61000-4-16:2015^[1] について解説する。なお、本稿は規格の内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らないので、規格についての正確な情報は規格そのもの^[1]を参照していただきたい。

1.1 背景

例えば次のような要因により、電源線やその他の長いケーブルが比較的低い周波数の妨害を受けることがある (§4.4):

- 通常の状態を持続的に、あるいは短絡事故や地絡事故に際して短時間発生して接地系統を介して、あるいは誘導によって結合する、電源の基本周波数 (DC、16 2/3 Hz^{†1}、50 Hz、60 Hz)、またその高調波や中間高調波の、配電系統に起因する妨害;^{†2}
- インバータやコンバータのようなパワー・エレクトロニクス・システムから浮遊容量やフィルタを介して接地系統に注入される、あるいは誘導によって信号/制御線に結合する妨害。^{†3}

^{†1} 16 2/3 Hz の電源は主に欧州の鉄道で用いられる。

^{†2} 航空機などで用いられる 400 Hz に起因する妨害はカバーされない。

^{†3} この種のシステムは電源線にこの周波数帯の顕著なノーマルモードの妨害も注入する傾向があるが、この規格はこのようなノーマルモードの妨害は扱わない。電源周波数の 40 倍までの高調波/中間高調波歪みに対するイミュニティは IEC 61000-4-13^[3] で、2~150 kHz のノーマルモード妨害に対するイミュニティは IEC 61000-4-19 で扱われている。

規格によってはこれと異なる条件が規定されていることもあるが、この規格は 20 m よりも短いケーブルへの接続のみが意図されたポートへの適用は意図されていない。また、この規格を参照している規格は、また機器の実際の使用でこの規格で模擬される妨害の影響を受けるリスクが高いと考えられるケースは比較的稀であり、実際の試験でこの規格が適用される頻度はそれほど高くない。

2 使用機器

2.1 試験発生器

2.1.1 主な特性

この試験に用いる試験発生器の主な特性は:

- 出力電圧、電流: 下記
- 周波数:
 - 短時間妨害: DC、16 2/3 Hz、50 Hz、60 Hz
 - 連続妨害: DC、15 Hz~150 kHz ($\pm 10\%$)
- ソース・インピーダンス: $V_{OC}/I_{SC} = 50 \Omega \pm 10\%$ ^{†4}
- 出力の品質:
 - DC: リップル < 5 %
 - AC: THD < 1 % (16 2/3 Hz、50 Hz、60 Hz の短時間妨害は < 10 %)
- 短時間妨害のオン/オフ:
 - DC: 立ち上がり/立ち下がり時間 1~5 μs
 - AC: ゼロ・クロス ($0^\circ \pm 5\%$) に同期

試験発生器は試験で必要となる開放回路電圧 (図 1) を想定される全ての負荷条件で発生させることが必要となる。

非シールド線への印加は試験発生器の 50 Ω に結合回路網の 100 Ω を加えた 150 Ω のコモンモード・インピーダンスを介して行なう (図 11) が、試験発生器から注入される電流への印加先のライン上の電圧の影響 (電流の逆流の可能性を含む) の考慮も必要となる (§4.2)。

^{†4} V_{OC} : 開放回路出力電圧、 I_{SC} : 短絡回路出力電流

シールド線への印加ではこの問題は生じないが、注入のインピーダンスが非シールド線の場合の 150 Ω の 1/3 の 50 Ω となり (図 12)、EUT 側で接地されたシールド線への印加に際して試験発生器から注入される電流はそれに依りて大きくなる。^{†5}

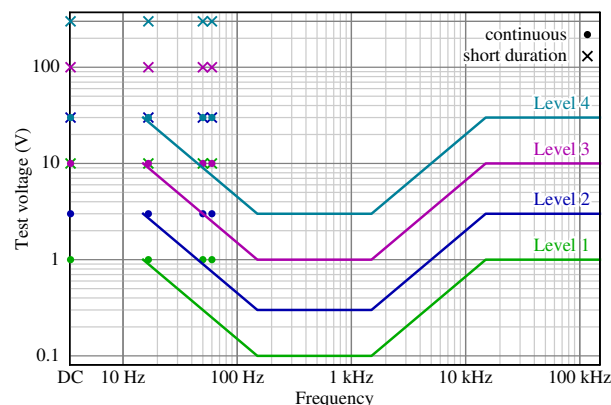


図 1: 試験レベル

2.1.2 試験発生器の構成

このような試験発生器は、例えば

- 信号発生器 (ファンクション・ジェネレータ)
- 必要な周波数範囲と出力電圧/電流に対応した 4 象限バイポーラ・アンプ^{†6}
- 50 Ω の無誘導電力抵抗

を用いて構成することができるであろう (図 2)。

2.1.3 試験発生器の検証

試験発生器は少なくとも以下のパラメータを検証する:

- 出力電圧波形

^{†5} 例えば試験レベル 4 の短時間妨害では 200 V、4 A、すなわち 0.8 kW の出力が必要となる。だが、シールドが EUT 側で低インピーダンスで接地されている場合はシールドに所定の電流が流れさえすれば試験の目的は果たせると考えられ、必要な場合、例えば 200 V を 50 Ω を介して印加する代わりに 40 V を 10 Ω を介して印加する、あるいは 4 A の電流源から印加するなどとしても同等の結果を得られそうである。

^{†6} 単純なケースでは、増幅器の出力の電圧と電流の極性は同一、すなわち出力電圧がプラスの時は出力電流もプラス (第 1 象限)、出力電圧がマイナスの時は出力電流もマイナス (第 3 象限) となる。だが、この試験では出力の電圧と電流の極性が逆となる、すなわち出力電圧がプラスの時の出力電流がマイナス (第 2 象限)、あるいは出力電圧がマイナスの時の出力電流がプラス (第 4 象限) となる可能性もある (§4.2)。このような場合、その増幅器は 4 象限動作が可能なるものであることが必要となる。

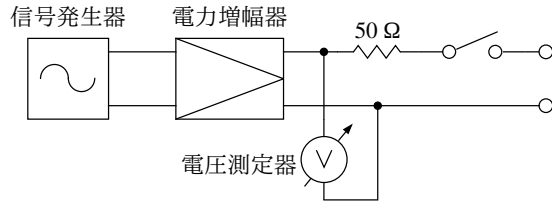


図 2: 試験発生器の構成の例

- ソース・インピーダンス V_{OC}/I_{SC}
- 周波数精度
- 開放回路出力電圧 V_{OC}
- 該当する場合、短時間妨害の立ち上がり/立ち下がり時間

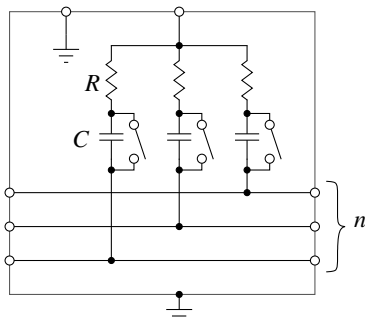
2.2 結合回路網

2.2.1 電源ポート、及び入出力ポート

電源ポートや入出力ポート（非シールド線）にはポート内のライン数 n に応じた図 3 に示すような結合回路網を用いる：

- $R = 100 \Omega \times n$
- $C = 1 \mu\text{F}$ (DC での試験では短絡)
- R と C は 1% の許容差で一致すること

結合回路網にはしばしば危険な電圧が印加されるので、安全上の要求への適合も考慮されたものであるべきであり、その使用に際しても適切な注意を払うことが必要となるだろう。



$$R = 100 \Omega \times n, C = 1 \mu\text{F}$$

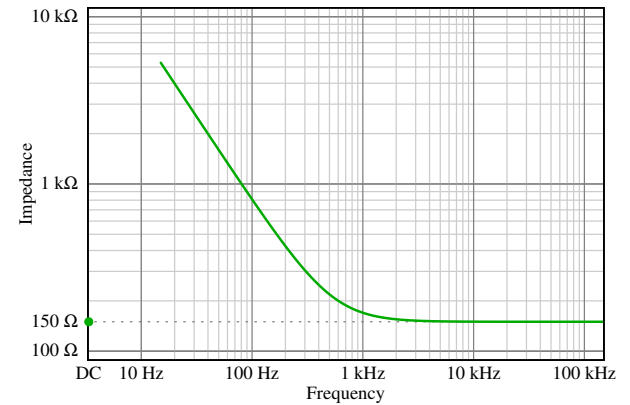
図 3: 結合回路網（電源ポート、入出力ポート用）

AC の妨害の印加は全ての結合回路網の抵抗 R と直列に $1 \mu\text{F}$ のコンデンサ C を接続して行なわれる。このコンデンサは接続先のポート上の直流や低

周波の電圧を阻止しながら印加される AC の妨害を通過させることが意図されている。

だが、この $1 \mu\text{F}$ という容量は信号線にとってはかなり大きく、この状態でもそのポートの動作に好ましくない影響を与えることがある。従って、このような結合回路網を接続した状態でもそのポートが正常に機能するかどうかを事前に確認することが望ましい。

一方、 $1 \mu\text{F}$ という容量は試験で印加される低い周波数範囲の妨害の注入も妨げる可能性がある（図 4）。この規格の規定上はそれは気にせずに試験を行えば良いと思われるが、試験として著しく甘いものとなる可能性も考えられそうであり、それが試験の目的を損なわないかどうかを考えた方が良いかも知れない。^{†7}



$$n = 2, R = 200 \Omega, C = 1 \mu\text{F}$$

図 4: 結合回路網のコモンモード・インピーダンス（試験発生器の 50Ω を含む）

DC の妨害の印加に際してはコンデンサ C は短絡され、それぞれの結合回路網の接続先のポート上の電圧が抵抗 R に直接印加されることになる。このため、これが接続先のポートに対する負荷となって好ましくない影響を与える可能性が高まるだけでなく、抵抗 R がそのポート上の電圧に応じた電力を持続的に消費することになる。

従って、この形での試験が必要となる場合、その

^{†7} 印加対象のポートが高いインピーダンスを持つ場合、直列の C によって注入インピーダンスがかなり高くなっても印加対象のポートに印加される電圧にはあまり影響せず、従ってこの場合は試験が著しく甘くなることもなさそうである。だが、例えば 2 線のポート ($R = 200 \Omega$) で、試験レベルが $50 \text{ Hz } 100 \text{ V}$ 、印加対象のポートが低インピーダンス（ここでは 0Ω と仮定）の場合、この C を通して妨害を印加した時に印加対象のポートに注入される電流は注入インピーダンスが 150Ω であった時に注入された管の電流である 0.67 A の $1/10$ 以下の約 0.06 A という計算となる。

ポートの動作への影響、また結合回路網の電圧や電力の定格に特に注意が必要となりそうである。^{†8†9}

2.2.2 平衡通信ポート

電話線 (PSTN) や EIA 485 のような平衡通信線には、ノーマルモードの信号への悪影響を生じにくい図5のような結合回路を使用できる。

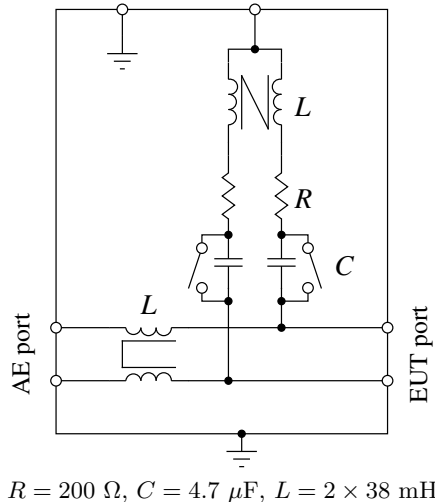


図 5: 結合回路網 (平衡通信ポート用)

2.2.3 シールド線

シールド線 (同軸ケーブルを含む) の試験発生器の接続や接地はシールドに直接接続することで行なう (図12, 図14) ので、結合回路は不要である。

2.3 減結合デバイス

減結合デバイスは印加された妨害が AE (補助機器) 側に漏洩することを防いで意図した妨害が EUT のポートに印加されるようにする、また印加された

^{†8} 例えば 2 線の I/O ポートで、一方のラインとグラウンドのあいだに AC 230 V が出力されているとすると、 $R = 200 \Omega$ で、終端に用いられた結合回路網の抵抗 R での損失は $P = 230^2 / 200 = 264.5 \text{ W}$ という計算となる。勿論、この AC 230 V が一方の相が接地された電源に由来するものであるとしてもこの試験に際しては絶縁変圧器を介して接続され、通常は片側が接地された状態となることはなさそうであるが、他のポートの終端の影響などでこの状態に近づくかも知れない。

^{†9} 状況によっては、機器の内部の分析などに基づいて一部のポート (例えば I/O ポートへの DC 妨害の印加に際しての AC 電源入力ポート) の終端に用いている結合回路網の C を短絡しないままとしても試験の結果に有意に影響しそうにないことを示し、それらのポートの終端に用いている結合回路網の C を短絡せずに試験を行なうことを正当化できるかも知れない。

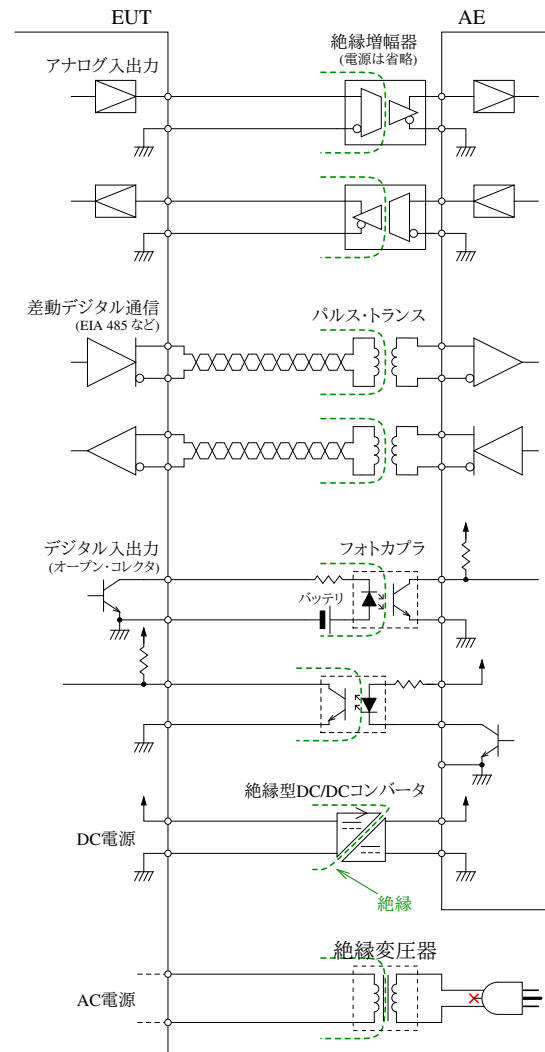


図 6: 減結合デバイスの例

妨害が AE のポートに印加されることを防いで AE を保護する役割を持つ。これは、EUT の試験されるポート全てと AE のあいだに、AE の近くに接続する。

この減結合回路網は次のような特徴を持つものが必要となる:

- 入出力間、また入出力とグラウンド^{†10}のあいだで 1 kV 以上の耐電圧 (50/60 Hz, 1 分) を持つ;
- 15~150 kHz の周波数範囲について入出力間で 60 dB 以上のコモンモード減結合を与える;
- そのポートに対して適切な入出力特性を持ち、意図された信号を正しく伝達する。

^{†10} 実際には AE 側のポートは AE のグラウンドから絶縁されている必要はないだろう。

規格では増幅器 (例えば絶縁型の計装増幅器のような)、フォトカプラ、絶縁変圧器 (例えばパルス・トランスのような) がその例として示されている (図6) が、これらに限らず、接続先のそれぞれのポートに対してそのポートに応じた、上記のような要求を満たすものを用意することが必要となる。

2.3.1 代替手段

実際の試験で EUT のそれぞれのポートに対する適切な減結合デバイスを用意することが難しく、EUT と AE のあいだを減結合デバイスを通さずに接続したままで試験を行ないたいと思うこともありそうに思われる。

次のような場合、EUT と AE のあいだに減結合デバイスを接続せずに試験を行なうことも可能かも知れない。

- AE がポートを 1 つだけ持つ、あるいは他のポート (電源を含めて) があるとしても全て開放のままとする場合。

例えば、ポートが 1 つだけの、電源を用いない、あるいはバッテリー動作のもの^{†11}は、その状態のまま使用できるかも知れない (図7)。

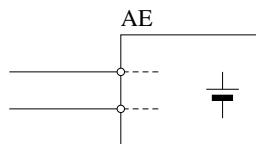


図 7: 単一のポートのみを持つ AE のイメージ

- AE のそのポートが他のポート (電源入力や接地、また同種の他のチャンネルを含む) から絶縁されている場合。

例えば、リレーの接点や巻線、フォトカプラの入力や出力のように所定の絶縁を与えるものがそのまま接続された I/O ポート、パルス・トランスで絶縁された通信ポートのようなものは、その外側の部分の AE の他の箇所 (同種の他のチャンネルを含む) からの絶縁が確保されているならばこの試験に必要な減結合を与えようである (図8)。

この場合、AE の代わりに EUT 自身の絶縁されたポートを用いることもできるだろう。

^{†11} 例えばバッテリー式のテスタや信号発生器のような。

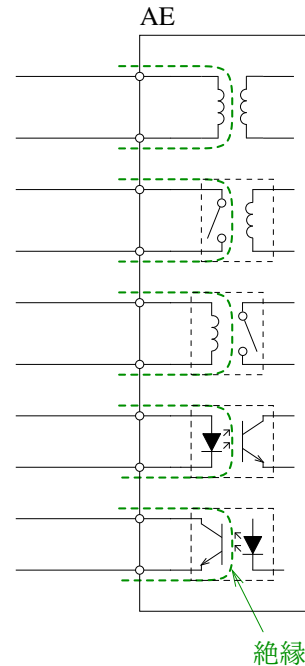


図 8: 絶縁されたポートを持つ AE のイメージ

- AE のポートが AE の他の部分からは絶縁されているが、同種のポートの他のチャンネルとは絶縁されていないような場合、その AE のそれらのポートを接続しない (妨害を印加するポートに接続するポートと絶縁されていない他のポート全てを使用せずに開放のままとする) のであればそのポートを他から絶縁された状態とできる (図9)。^{†12}

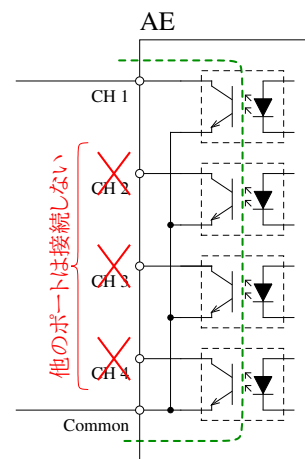


図 9: 他からは絶縁されているがチャンネル間が絶縁されていないポートを持つ AE のイメージ

^{†12} この場合、AE の他のポートを接続するとそのポートを介して意図しない箇所にも妨害が印加されるとともに、その経路を介して注入された電流が漏洩して試験対象のポートに印加される妨害のレベルを低下させる可能性がある。

- AE のポートが絶縁されていない場合も、その AE の他のポートを接続しない (同種の他のチャネルも使用せずに開放のままとする) のであれば電源に絶縁変圧器 (AC 電源の場合) か絶縁型コンバータ (DC 電源の場合) を入れて絶縁し^{†13}、また接地接続も切り離せば、そのポートを他から絶縁された状態とできる (図 10)。

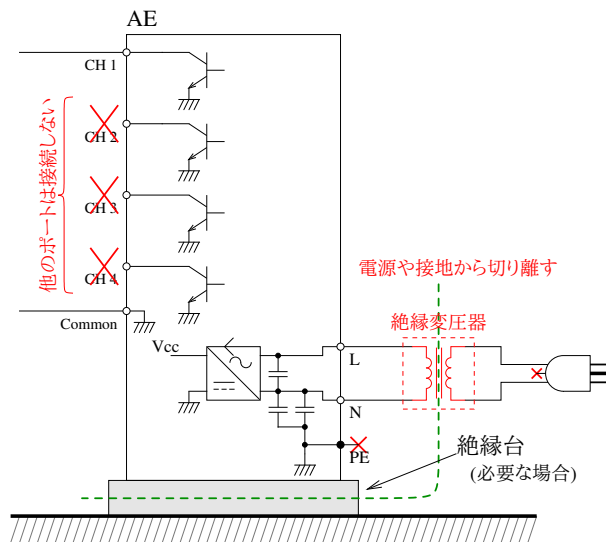


図 10: 絶縁されていない AE の絶縁の例

これらの絶縁は減結合デバイス (§2.3) としての要求を満たすものであるべきである。だが、最低限、AE 側のコモンモード・インピーダンスを結合回路網のコモンモード・インピーダンス (図 4) よりも十分に高くでき、また試験に際して印加される最大電圧に対してその状態を維持できるならば、意図した妨害が EUT のポートに印加されるようにするという目的は達成できそうである。^{†14}

このような方法を用いる場合、AE のポートにも試験で印加された電圧 (電圧の印加はコモンモードで行なわれるが、条件によってはかなり高いノーマ

^{†13} AC 電源入力 of 機器の多くは AC 電源入力と DC 回路のあいだは絶縁された AC/DC 変換器で分離されており、そのような場合、絶縁変圧器を外付けせずに、保護接地 (PE) などの接地への接続があればそれを切り離すだけで済むように思えるかも知れない。だが、実質的にそれを横切るようにコンデンサやサージ・アブソーバなどが接続されているかも知れず、また保護接地が設けられている機器の保護接地を適切な防護処置を講じずに切り離すことは危険であるので、それが不要だということがわかっている場合を除き、そのような場合も絶縁変圧器を用いるのが確実だろう。

^{†14} 必要な場合、この条件が達成されているかどうかは、例えば結合回路網と EUT のあいだの接続を切り離して試験周波数範囲の電圧を印加した時に AE に印加される電圧を測定することで確認できるだろう。AE 側のコモンモード・インピーダンスが十分に高ければこの状態で AE に印加される電圧は試験発生器の開放回路出力電圧とほぼ一致する筈である。

ルモード電圧を生じるかも知れない) が印加されることにも注意すべきであろう。

3 試験

3.1 試験セットアップ

各機器 (EUT、AE、結合回路網、その他の試験機器) は該当する接地要求に従って接地する。

但し、図 10 のように AE をフローティングとするためにはその AE の接地接続を切り離すことも必要となる。

グラウンドプレーンの使用は必須ではないが、グラウンドプレーン (保護導体に接続されたもの) がある場合は接地はグラウンドプレーンに対して行なうこともできる。

ケーブルは製造業者が規定したものを扱い、規定がない場合はその信号に対して適切なシールドされていないものを用いる。

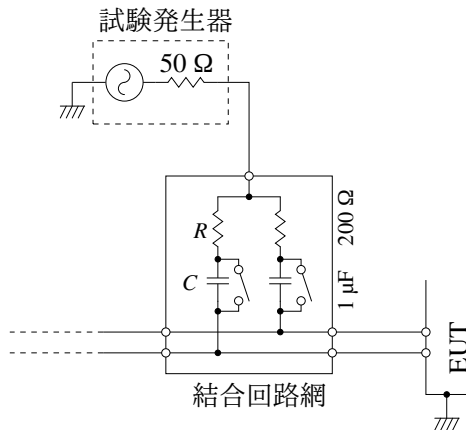
この試験では接続ケーブルの長さは重要ではなく、任意の長さのケーブルを用いることができる。但し、シールド線については製造業者が最大長を規定していればその長さ、規定していない場合は 20 m とする。

試験対象となるポートに接続される AE は AE の近くに取り付けた適切な減結合デバイス (§2.3) によって減結合するか、あるいはその代わりとなる適切な手段 (§2.3.1) を用いて印加された妨害が AE 側に流れ込まないようにする。

試験対象のポートには適切な結合回路網 (§2.2) を介して試験発生器 (§2.1) を接続し、妨害を印加できるようにする (図 11)。但しシールド線に対しては結合回路網を用いずに試験発生器の出力をシールドに直接接続する (図 12)。^{†15†16}

^{†15} 試験発生器の出力をシールドのどの位置に接続すべきかは明確ではないが、図 12 など で図示したように遠端で接続し、妨害電流がシールド線の全長を流れるようにすべきであろう。

^{†16} この規格の文面上はシールドの接地の有無による区別は行なわれていない。だが、シールドが両端で接地される場合以外、そのシールドはこの試験で扱われる妨害に対する保護を与えそうになく (§4.3)、この方法での試験は適切とは言えないものとなりそうである。従って、シールドが両端で接地される場合以外はシールドされていないケーブルが用いられた場合と同様の試験も行なうようにする価値があるかも知れない。



DC 妨害の印加に際しては C は短絡
図 11: 非シールド線への妨害の注入

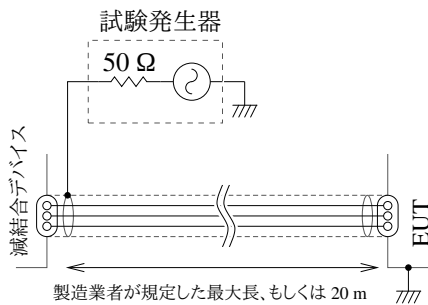
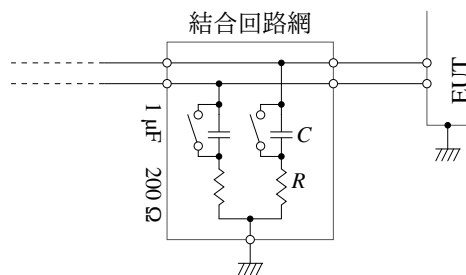


図 12: シールド線への妨害の注入

EUT のその他のポートは適切な結合回路網 (§2.2) を介して接地する。^{†17†18} 但しシールド線については結合回路網を用いずにシールドを直接接地に接続する (図 14)。



DC 妨害の印加に際しては C は短絡
図 13: 非シールド線の接地への接続

^{†17} 妨害の印加は試験発生器の 50Ω のインピーダンスを加えた 150Ω のコモンモード・インピーダンスで行なわれるが、この終端の処理は 100Ω のコモンモード・インピーダンスで行なわれる。

^{†18} 非常に多くのポートを持つデバイスでは全てのポートを結合回路網を介してこのように接地することは実際的ではないかも知れない。状況によっては、機器の内部の分析などに基づいて一部のポートのこの接地の有無が試験の結果に有意に影響しそうなことを示し、それらのポートについてこの接地を行わずに試験を行なうことを正当化できるかも知れない。

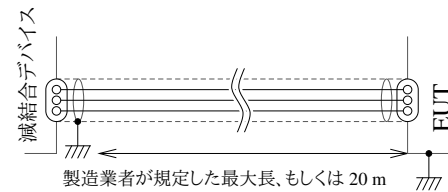


図 14: シールド線の接地への接続

結合回路網のコンデンサ C は DC の妨害の印加に際しては全て短絡する (図 11, 図 13)^{†9}。

3.2 試験の実施

§3.1 で述べたように他のポートは終端 (接地) した状態とし、試験発生器を試験対象となるそれぞれのポートに順に接続して所定の妨害の印加を行なう。DC 妨害の印加は極性を逆にしても実施する。

電源周波数の妨害の印加は使用場所で想定される主電源電圧に応じて DC (双方の極性)、 $16 \frac{2}{3}$ Hz、50 Hz、及び 60 Hz の 1 つ以上で実施する。短時間妨害の印加は、EUT の性能の検証を完全に行なうために必要な時間に達するまで繰り返す。^{†19}

15 Hz ~ 150 kHz の周波数範囲の妨害の印加は、ステップでの掃引の場合は前の周波数の 10 % を超えない周波数ステップで、 1×10^{-2} decade/s を上回らない掃引率で掃引して行なう。^{†20}

試験レベルは試験発生器の開放回路出力電圧 (§2.1.3 で確認される) で設定する。試験発生器が図 2 に例示したような構成のものであればこの電圧を適切な電圧測定器 (例えばオシロスコープと電圧プローブ) で直接観測することも、またそれを試験レベルの制御に用いることもできるであろう。

4 補足

4.1 結合回路の接続の EUT の動作への影響

結合回路の接続の対象となる I/O ポートなどがある場合、結合回路の接続が EUT システムの動作に

^{†19} この時間、また連続妨害を印加すべき時間は EUT や動作条件などに依存し、従ってテスト・プランで規定すべきであろう。

^{†20} 15 Hz ~ 150 kHz は 4 デイケードで、 1×10^{-2} decade/s の掃引率での掃引には 400 秒を要する。

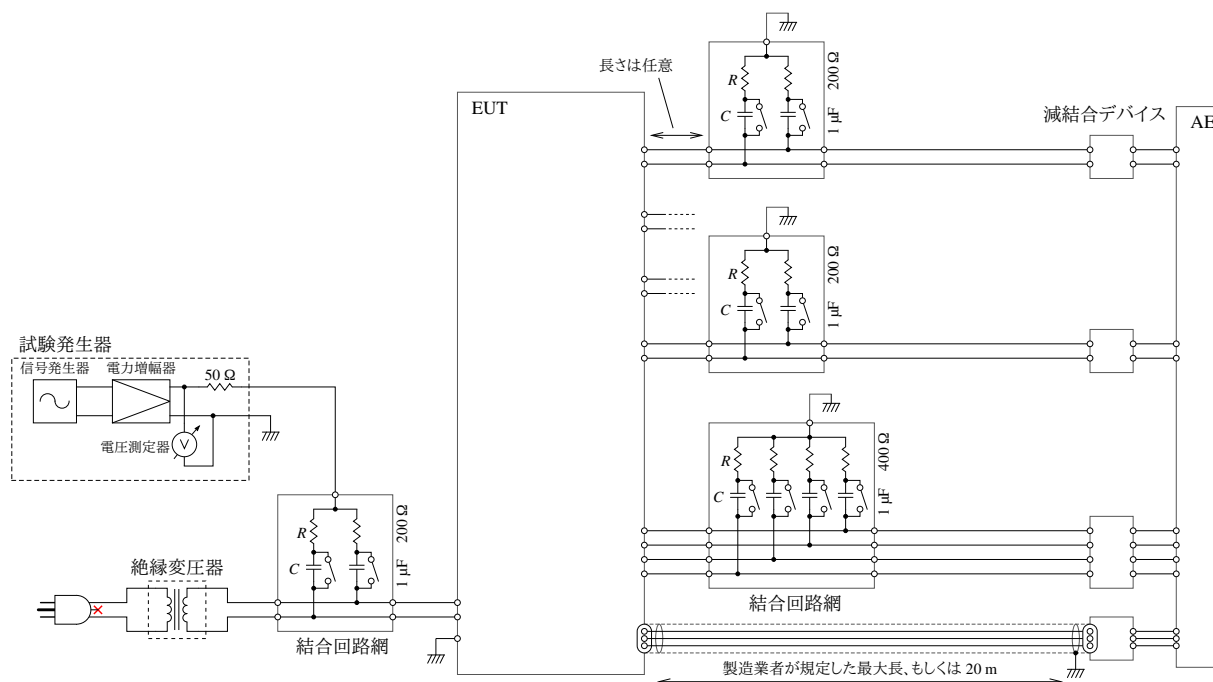


図 15: 非シールド線への AC 妨害の印加のための接続の例

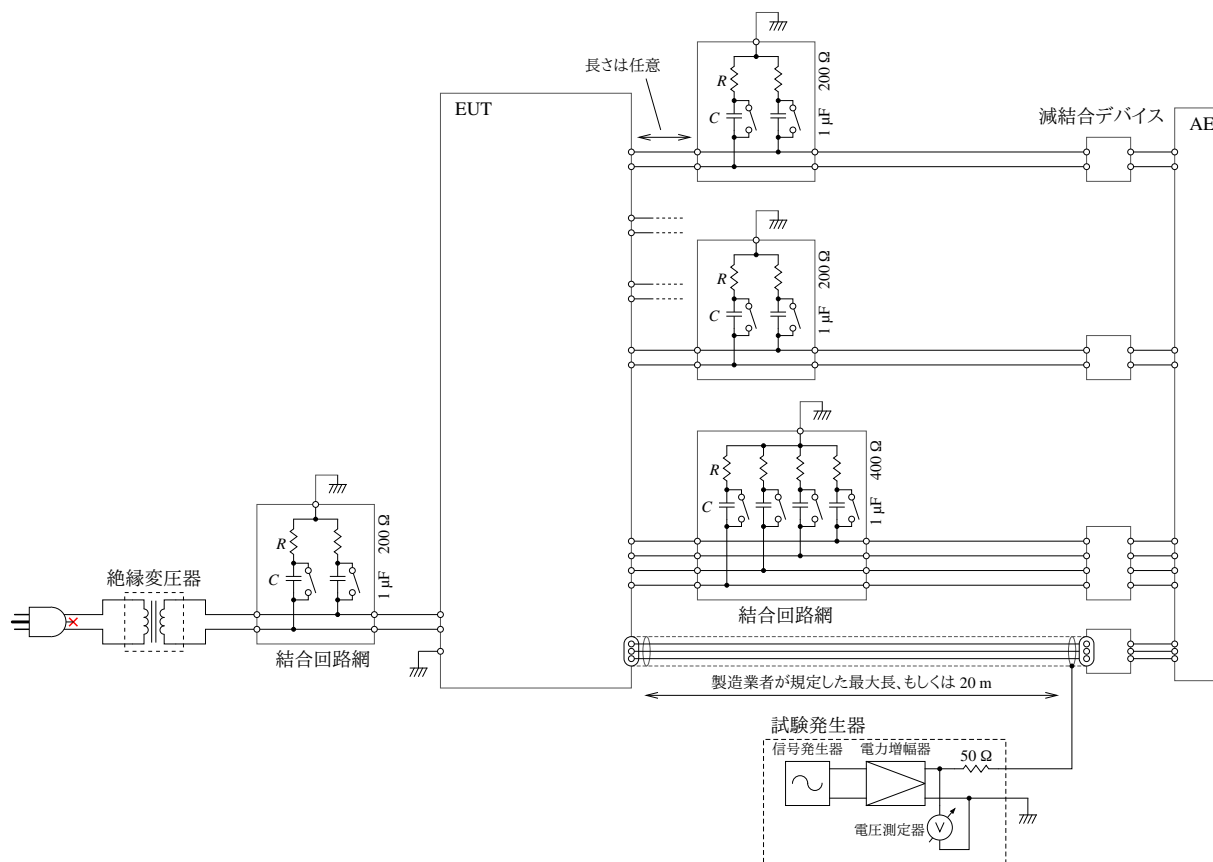


図 16: シールド線への AC 妨害の印加のための接続の例

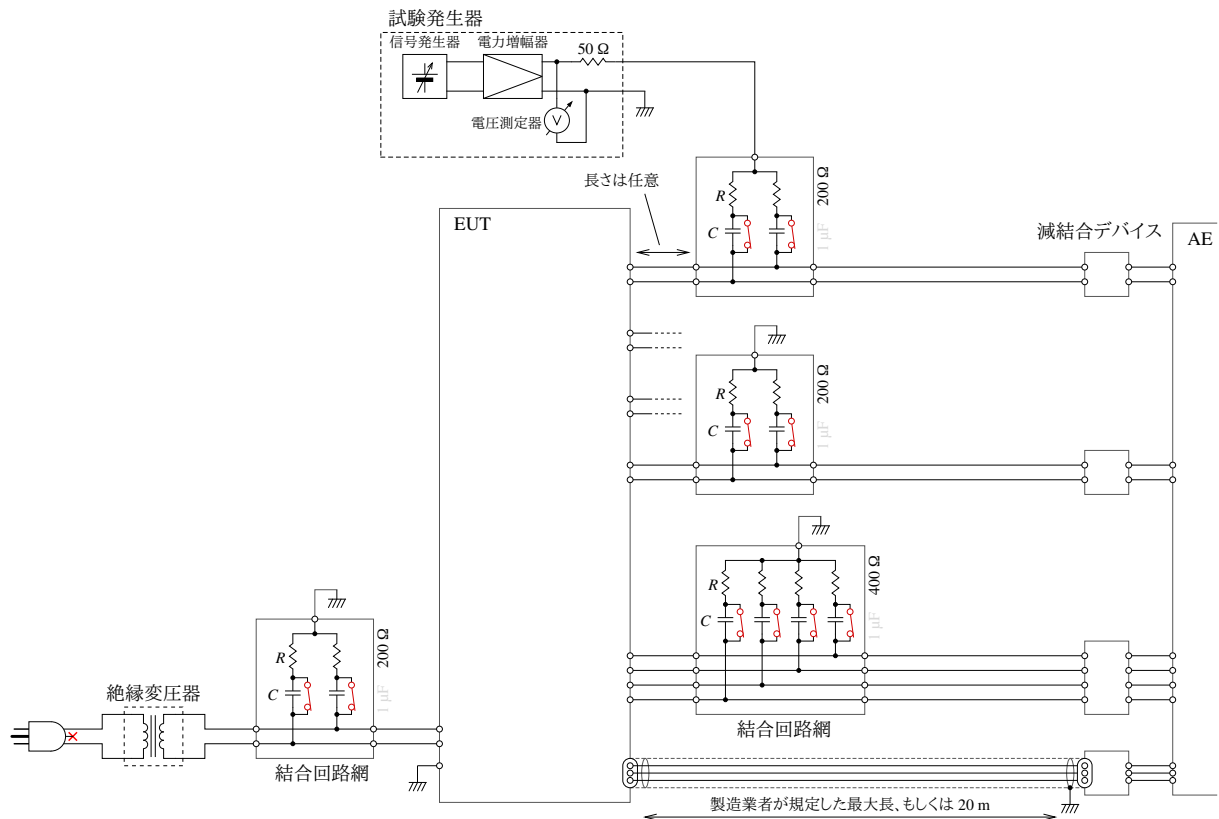


図 17: 非シールド線への DC 妨害の印加のための接続の例

著しい影響を与えて試験の適切な実施を妨げることがある。

例えば図 18^{†21}(a) のように定電流出力でソースされるアナログ信号を 100 Ω の負荷抵抗で受けているとした場合、受信されるアナログ信号のレベルは結合回路での終端を行なうと約 67 % に低下する (例えば出力が 10 mA の時に約 6.7 mA と測定される) ことが予想される。^{†22}

また、図 18 (b) の例では、負荷となるリレーの特性によっては結合回路での終端を行なうとオープン・コレクタの出力の状態に関わらずリレーがオンのままとなる、あるいは一度オンとなると出力がオフとなってもリレーがオフに復帰しない状態となる可能性が予想される。^{†23}ここではリレー負荷を例と

^{†21} ここではわかりやすいように結合回路の 1 μF のコンデンサを短絡しての終端の例を示しており、また実際にも結合回路のコンデンサを短絡している場合に問題を生じやすいが、結合回路の接続に伴う問題はコンデンサが短絡されている場合に限らない。

^{†22} ここでは、結合回路を接続し、だが妨害は印加していない状態のみを考える。以下も同様。

^{†23} 例えばリレーの巻線抵抗が 1 kΩ 程度以上 (定格 24 V や 48 V のリレーでそうなるかも知れないように) であれば出力オフ時の巻線電圧は電源電圧の 80 % を超えることから意図された出力の状態と無関係にリレーはオンのままとなりそうである。

して示したが、例えばプルアップ抵抗と電圧入力のリレー、あるいはフォトプラなどでオープン・コレクタの出力を受けるような場合も、回路の構成や定数など (例えばプルアップの抵抗値やリレーの閾値のような) にもよるが、結合回路での終端を行なうと出力がオフ (ハイ) の時でもオン (ロー) と誤判定される状態となる可能性が高そうである。

一方、図 18 (c) の例では、結合回路の接続に伴う負荷の増加が出力段やその電源を過負荷としない限りは結合回路での終端を行なっても結合回路を接続していない時と同様の動作を維持できそうである。

この規格では試験構成が I/O ポートの動作状態に影響する場合はその状態を基準として試験電圧の印加の影響を評価するように述べられているが、そのような対応が難しい場合も珍しくないだろう。例えば上記の図 18 (a) のアナログ・ポートの例では結合回路を接続した状態での信号レベルを基準としてそれからのずれを評価することができるかも知れない。だが図 18 (b) の例についてはそのような対応はできそうになく、他の対応が必要となりそうである。

この種の事項は EUT や AE の回路に、また動作

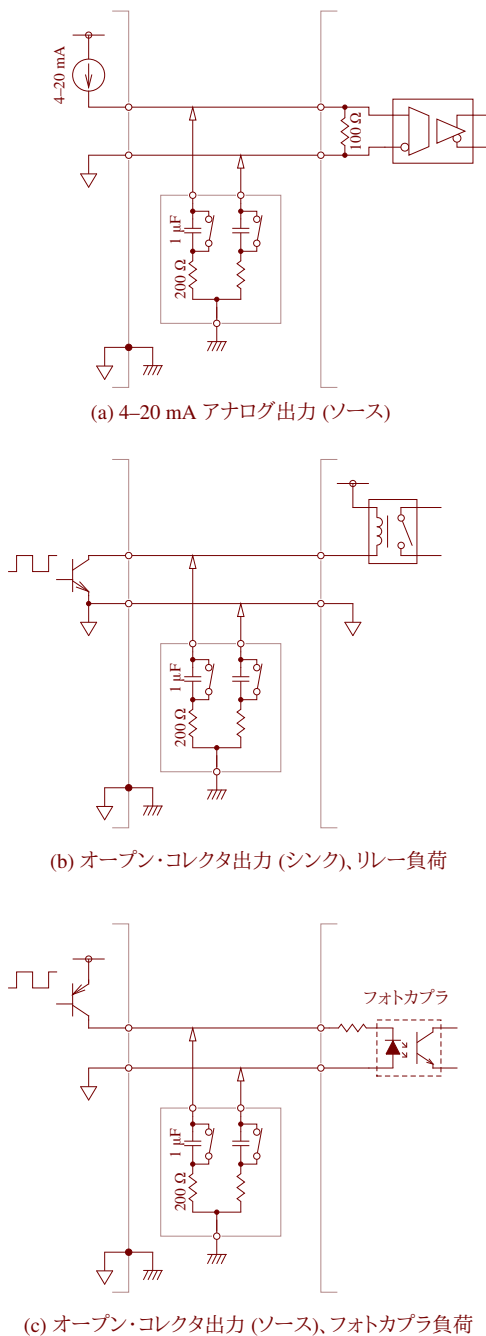


図 18: I/O への結合回路の接続のイメージ

条件や性能基準に強く依存するので、試験に先立って個別に分析を行ない、適切な対応を行なうようにすべきである。^{†24}

これについては本稿では踏み込まないが、それを

^{†24} この問題がある場合、多くは試験時に気付かれる(多くは明らかな異常動作を生じること) ことになるであろうが、その場合も少なくとも試験の遅延を生じそうである。また、例えば図 18 (b) のような構成の I/O をオン状態固定としてこの試験を行なったような場合、出力側が誤動作によってオフとなったとしてもその誤動作は検知されないことになりそうである。

受け入れられる場合、この試験で模擬されるような妨害を受けるかも知れない場合(規格の観点ではケーブルが 20 m を超える場合)にはシールドを行なうという対応は常に有効なものとなるであろう。

4.2 ライン上の電圧の試験への影響

例えば、2 線の I/O ラインに DC +100 V の妨害を印加する際に試験発生器から注入される電流は高々 0.7 A 程度となりそうであるが、そのラインの一方が接地されておりライン間に AC 230 V が印加されている場合、次のような影響が生じる可能性も予期される(図 19):

- ライン上の電圧のマイナス側のピーク(非接地側のラインの電位は $-230\text{ V} \times \sqrt{2}$ となる)においては試験発生器から注入される電流は 1.7 A を超える;
- ライン上の電圧のプラス側のピーク(非接地側のラインの電位は $+230\text{ V} \times \sqrt{2}$ となる)においては試験発生器に 0.4 A 程度の電流が逆流する。

電流の逆流は試験レベルが低い時により大きくなり、例えば試験レベル DC +1 V では 1 A 強の逆流の発生も予期される。

このような状況となる可能性がある場合、試験発生器は、逆流する電流を吸収できることを含めて、その全ての条件で正常に機能することが必要となる。

4.3 ケーブルのシールドの効果

機器間の接続にシールド線が用いられている場合、誘導結合や接地電位差などに伴う妨害 (§4.4) をそのケーブルが受けた時、それに伴って流れる電流の多くがシールドを流れ、また機器のあいだがシールドによって接続されることで機器間の電位差が抑制され、そのケーブルの内部の導体(それが接続された回路)が受ける妨害を大きく低下させることが期待される。

だが、このような効果が期待できるのはそのシールドの両端がそれぞれの筐体や接地に低インピーダンスで接続されている場合に限られる。

シールドの片端、もしくは両端が筐体や接地に接続されていない場合、電流はシールドには流れず、

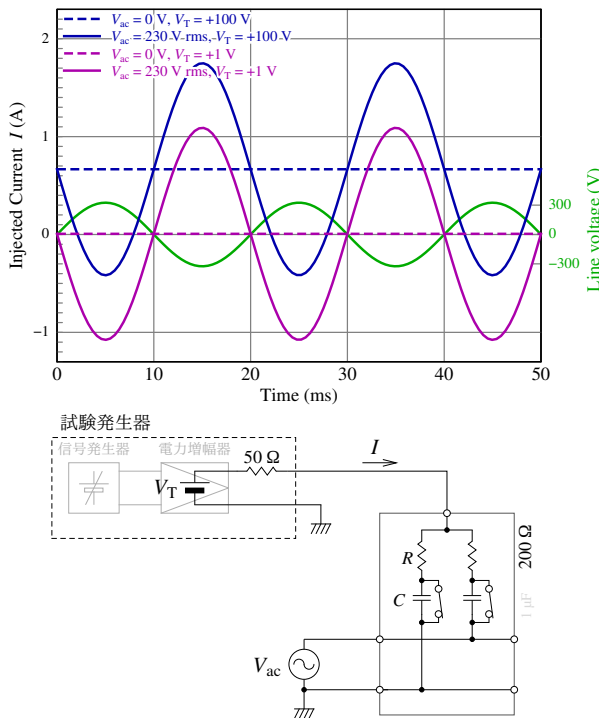


図 19: ライン上の電圧の試験への影響の例

従ってそのシールドはこの規格で扱われるような妨害に対する保護を与えそうにない。例えば機器間に接地電位差が生じた時はその電圧はシールドがなかった場合と全く同様にケーブルの内部の導体（それが接続された回路）に加わるであろうし、そのケーブルが誘導結合を受けた時は誘導電流はシールドがなかった場合と全く同様にケーブルの内部の導体に流れるであろう。

この規格ではシールド線の試験ではシールドに妨害を印加するように述べられており、シールドの両端の処理による区別は行なわれていない。

だが、シールドが両端で接続された場合以外にはこの方法での試験は実際に予期される状況を模擬しそうにない、そのようなケーブルは非シールド線の場合と同様に試験する（あるいはその形での試験も行なう）価値がありそうである。

4.4 妨害の発生と結合

4.4.1 妨害の発生源の例

- 電源周波数 (DC, 16 2/3 Hz, 50 Hz, 60 Hz)

電源系そのもの、特に高電圧、及び/もしくは大電流を扱うもの;

また、電源系の短絡事故や地絡事故に伴って発生し、しばしば接地系統に流し込まれる、電源系に起因する極度に大きな電流

- ～数 kHz

電源電流の高調波歪みや中間高調波歪みを引き起こす、電源に接続される様々な機器、例えば整流平滑回路や位相制御回路を含むもの (図 21, 図 22)、アーク炉など

- 数 kHz～

しばしば数 kHz よりも高い周波数で大電力をスイッチングする、パワー・エレクトロニクス・システム、例えばモータ駆動用のインバータ (図 20) など

4.4.2 妨害の結合のメカニズムの例

4.4.2.1 ケーブル間の誘導結合

[6] では、金属面から h の高さに距離 d を隔てて平行に引かれた長さ l の 2 本のワイヤ (図 23) の間の相互インダクタンス M に関して次のような近似式が示されている:^{†25}

$$M \approx 10^{-7} \times l \times \ln \left(1 + \left(\frac{2h}{d} \right)^2 \right)$$

これらのワイヤが金属面から離れた位置に互いに密着して引かれている、例えば $h = 2 \text{ m}$ 、 $d = 0.01 \text{ m}$ 、 $l = 100 \text{ m}$ とすると、この近似式からは相互インダクタンスは $M \approx 0.12 \text{ mH}$ と推定される。

これらのワイヤの一方 (例えばインバータ・ケーブル) に $f = 10 \text{ kHz}$ で $I = 1 \text{ A}$ のコモンモード電流が流れているとすると、この相互インダクタンス M によって他方のワイヤ (例えば I/O ケーブル) に $2\pi f M I \approx 7.5 \text{ V}$ の電圧が誘導すると推定される。

一方、ワイヤ間の距離を離し、また金属面に密着させて引いた場合、例えば $h = 0.02 \text{ m}$ 、 $d = 0.1 \text{ m}$ 、 $l = 100 \text{ m}$ とすると、この近似式からは相互インダクタンスは $M \approx 0.0015 \text{ mH}$ と推定され、誘導電圧の大幅な低減が期待される。

^{†25} $r_a = r_b = r$, $h_a = h_b = h$, $r \ll d$, $l \gg \max(h, d)$, $w \gg \max(h, d)$ (w は金属面の幅) と仮定して式を簡略化。実際には加害者側と被害者側のケーブルの導体は同じ太さではなく ($r_a \neq r_b$)、また太いケーブルを密着させた場合は $r \ll d$ となるだろうが、ここではそれは無視している。

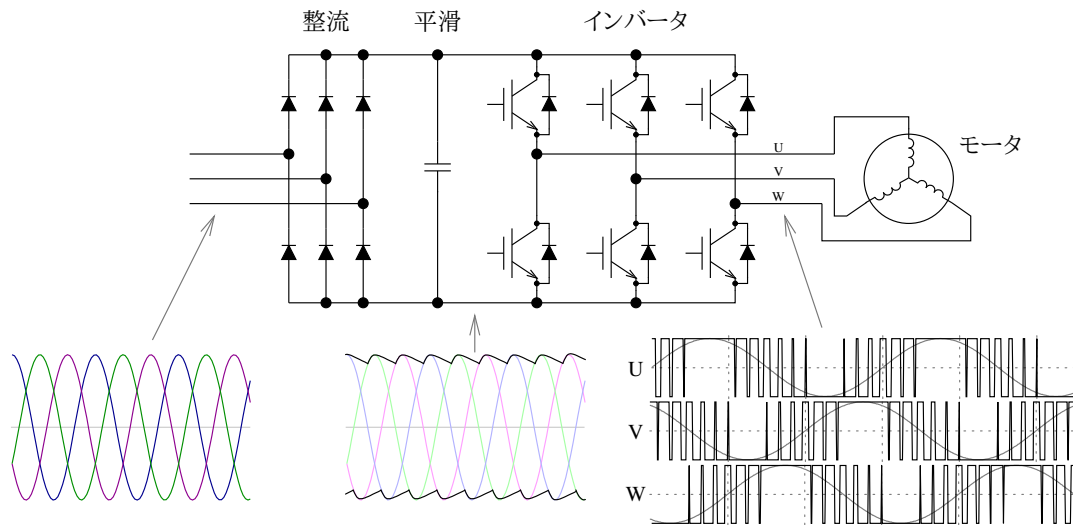


図 20: モータ駆動用のインバータの原理の例

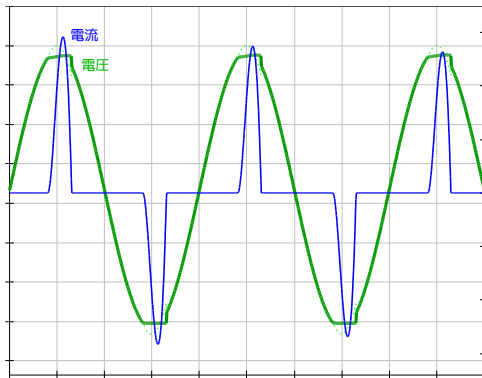


図 21: コンデンサ・インプット型整流平滑回路の入力電流に伴う電圧波形の歪みの例 (シミュレーション)

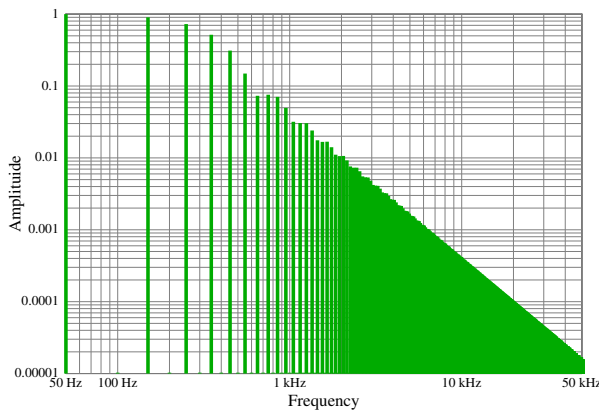


図 22: コンデンサ・インプット型整流平滑回路の入力電流 (図 21 の電流波形) のスペクトラムの例

実際の施設では、例えば、ケーブルのあいだの距離を離し^{†26}、適切に接地された金属のケーブル・ト

^{†26} [5] ではインバータ・ケーブル (クラス 4) と I/O ケーブル (クラス 2) は 450 mm 以上離すことが推奨されている。

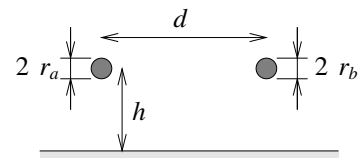


図 23: 金属面上に平行に引かれた 2 本のワイヤ

レーを用いることなどでこれに近い状況とすることができるだろう。[4][5]

4.4.2.2 接地電位差

接地系統にはノイズ・フィルタや浮遊容量を介して生じた電源周波数から高い周波数までの様々な周波数の漏洩電流が流し込まれる。一般にはそれぞれの機器が発生する漏洩電流はそれほど大きいものではないが、施設内には多数の機器があり、全体としての漏洩電流は相当大きなものとなる。

また、例えばインバータで駆動される大型のモータ (図 20) のようなものは、比較的高い周波数まで広がる相当のレベルの電流を接地系統に流し込むことがある。^{†27}

接地系統に流し込まれたこのような電流は接地系統を通して還流し、接地系統のインピーダンスと電流に応じた接地電位差を引き起こす。

^{†27} この種のシステムでは、高いレベルのコモンモード成分を、また広い周波数範囲の成分を含む高周波でスイッチングされた電圧がそのまま負荷となるモータの巻線に印加される。巻線は鉄心に巻かれており、鉄心とのあいだに大きな浮遊容量を持つため、これが巻線から浮遊容量を介して鉄心へ、そして金属のフレーム (しばしば金属構造にボルト止めされる) や軸 (負荷に接続される) を通して接地へと流れる大きな漏洩電流を引き起こすことがある。

施設内で地絡事故が発生した場合、通常は保護デバイスで電力が遮断されるまでの限られた時間のあいだ、接地系統に電源周波数の極めて大きな電流（例えば 100 A を超える）が流し込まれ、接地系統を通して還流するとともに、そのインピーダンスに応じた著しい接地電位差を引き起こす。^{†28†29}

このような持続的に、また一時的に生じる接地電位差は異なる場所で接地系統に接続された機器のあいだに直接印加される形となり、それらの機器のあいだの電気的接続は電源周波数の著しいコモンモード妨害に曝されることになる。

このような接地電位差は接地系統のインピーダンスを下げればそれに応じて低減される。[4] や [5] で示されているようなメッシュ状の接地ネットワーク^{†30}の使用は接地系統のインピーダンスを下げた接地電位差を低減するとともに誘導による妨害の結合も低減し、この規格で扱われているような妨害を効果的に低減することが期待される。

また、このような接地ネットワークを用いることができない場合も、前項でも触れた接地された金属のケーブル・トレーのようなものを用いることで、あるいは平行接地導体 (PEC)^{[4][5]} としてケーブルと並行して太い接地線を引くだけでも相応の効果を期待できる。

5 参考資料

- [1] IEC 61000-4-16:2015, *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-16: Testing and measurement techniques — Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz*
- [2] IEC 61000-4-6 の概要 — 無線周波伝導妨害イミュニティ試験の方法, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2024,
<https://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>

- [3] 交流電源の高調波/中間高調波歪みに対するイミュニティ — IEC 61000-4-13 の概要, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2022,
<https://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>
- [4] IEC TR 61000-5-2:1997, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling*
- [5] システムと施設の EMC — Part 2: 施設のための EMC テクニック, Keith Armstrong, 佐藤 訳, 2000,
<http://t-sato.in.coocan.jp/sysemc/contents.html>
- [6] *Electromagnetic Compatibility Handbook*, Kenneth L. Kaiser, CRC Press, 2004, ISBN: 0849320879

^{†28} 単純に電源と接地のインピーダンスが同程度と仮定すると、地絡を生じた点における接地電位は電源電圧の 1/2 近く、たとえば電源電圧が 230 V であれば 100 V 前後に達する計算となる。

^{†29} この電流はそもそもは電源系統から流し込まれたものであるため、電源系統にも著しいコモンモード電流が流れた状態となり、その接地系統や電源系統の近くを引かれたケーブルへの著しい誘導も（そして伝導エミッションや放射エミッションの問題も）引き起こすことが予期される。

^{†30} しばしば“Mesh-CBN”と呼ばれる。前項で触れた接地された金属のケーブル・トレーのようなものもこの接地ネットワークの一部となる。