

# 可変速駆動システムの EMC — IEC 61800-3 の概要

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2020 年 2 月 3 日

## 目次

1	概要	1
2	主な用語	2
2.1	可変速駆動システムの構成要素	2
2.2	環境	2
2.3	PDS のカテゴリ	2
3	試験	2
3.1	試験時の構成、動作条件	2
3.2	補足	3
4	イミュニティ要求	4
4.1	性能判定基準	4
4.2	イミュニティ試験レベル	4
4.3	低圧 PDS の試験に関する補足	4
4.3.1	高調波	7
4.3.2	転流ノッチ	8
4.3.3	電圧偏差	10
4.3.4	ディップ/短時間停電	10
4.3.5	電圧不平衡	11
4.3.6	周波数変動	11
4.3.7	IEC 61000-4-3 (放射電磁界)	12
4.3.8	IEC 61000-4-4 (電氣的ファスト・トランジェント/バースト)	12
4.3.9	IEC 61000-4-5 (サージ)	12
4.3.10	IEC 61000-4-6 (RF 電磁界によって誘導された伝導性妨害)	12
5	エミッション要求	13
5.1	転流ノッチ	13
5.1.1	サイリスタ・ブリッジ整流回路での転流ノッチの発生	14
5.2	電源高調波	14
5.3	電圧変動/フリッカ	14
5.4	高周波エミッション	15
5.4.1	共通事項	15
5.4.2	電源ポート伝導エミッション	16
5.4.3	パワー・インターフェース伝導エミッション	16
5.4.4	プロセス測定/制御ポート伝導エミッション	17
5.4.5	放射エミッション	17
6	ユーザーへの情報	18
7	安全関連機能を持つもの	20
7.1	PDS(SR) の安全関連機能	20
7.1.1	停止機能	20
7.1.2	監視機能	20
7.2	性能判定基準 FS	21
7.3	PDS(SR) のイミュニティ試験レベル	21
8	参考資料	23

## 1 概要

IEC 61800-3<sup>[1]</sup> は可変速駆動システムに対する最小限の EMC 要求を定めるもので、AC 35 kV 以下の入出力電圧の可変速駆動システム全体に、またそのような可変速駆動システムを構成する駆動モジュールなどに適用される。

可変速駆動システムは、例えば工作機械、ロボット、搬送機器、ポンプなどで用いられることがある。この規格は可変速駆動システムそのものに対して適用され、可変速駆動システムを含む機器やシステムに対してはこの規格ではなくその機器やシステムに該当する規格が適用される。<sup>†1</sup>



Photo by Jouko Niiranen, ABB Drives, licensed under CC BY-SA 3.0

<sup>†1</sup> 規格によって (またそれぞれの機器やシステムによって) 要求事項に相違がある<sup>†2</sup>、この種のデバイスの EMC は設置や使用の方法に強く依存する、最終的な機器やシステムでは複数の可変速駆動システムやその他のデバイスが使用されることが多いなどの理由から、可変速駆動システムのこの規格への適合はその可変速駆動システムが機器やシステムの該当する規格への適合性を損なわないことを意味しない。従って、可変速駆動システムの設計や評価に際しては、その可変速駆動システムがどのような用途でどのような形で使用されるか、そしてその可変速駆動システムを用いた機器やシステムがどのような規格の対象となるかなどの考慮も必要となるかも知れない。

<sup>†2</sup> 例えば、カテゴリ C3 のエミッション限度は IEC 61000-6-4:2018 や CISPR 11 ( $\leq 20$  kVA) などの限度よりも高い、第 2 種環境での 2 GHz 以上の放射電磁界イミュニティ (IEC 61000-4-3) 試験レベルは 2~2.7 GHz で 1 V/m となっているが IEC 61000-6-2:2016 では ~6 GHz で 3 V/m となっている、など。

本稿では、この IEC 61800-3:2017<sup>[1]</sup> の概要を述べる。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<sup>[1]</sup> を参照していただきたい。

## 2 主な用語

### 2.1 可変速駆動システムの構成要素

- PDS (power drive system)
 

1 つ以上の CDM とモータ (モータの軸と機械的に結合したセンサがあればそれを含む) から成るシステム
- CDM (complete drive module)
 

BDM と、保護デバイス、変圧器、補助装置などの追加部分から成る、駆動モジュール
- BDM (basic drive module)
 

電源とモータのあいだに接続される、電力変換器とそれに関連する制御部
- サブ・コンポーネント
 

機器の物理的な一部で、製造業者が規定した固有の機能を持ち、独立して機能することができるもの

### 2.2 環境

- 第 1 種環境 (first environment)
 

居住施設、及び居住の目的で用いられる建屋に給電する低圧配電網に中間変圧器なしで直接接続することが意図された施設を含む環境
- 第 2 種環境 (second environment)
 

居住の目的で用いられる建屋に給電する低圧配電網に中間変圧器なしで直接接続することが意図されたもの以外の全ての施設を含む環境

### 2.3 PDS のカテゴリ

- カテゴリ C1
 

第 1 種環境での使用が意図された、定格電圧 1000 V 未満の PDS

- カテゴリ C2
 

第 1 種環境で使用される場合は専門家<sup>†3</sup>のみによる設置と試運転が意図された、プラグイン型でも可搬型でもない、定格電圧 1000 V 未満の PDS
- カテゴリ C3
 

第 2 種環境での使用が意図された、第 1 種環境での使用は意図されていない、定格電圧 1000 V 未満の PDS
- カテゴリ C4
 

定格電圧 1000 V 以上、定格電流 400 A 以上、あるいは第 2 種環境の複雑なシステムでの使用が意図された PDS

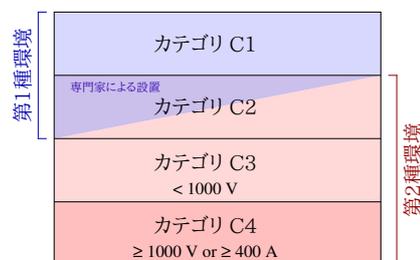


図 2: PDS のカテゴリ

## 3 試験

### 3.1 試験時の構成、動作条件

PDS は取扱説明書で示された全ての通常の動作条件で要求に適合しなければならない。

試験では、その PDS の典型的な構成、仕様の範囲内の負荷で、その特定の PDS に関して EMC に関して最も不利となるであろう条件を選択する。製造業者はその選択を正当化し、試験で実際に適用された構成や負荷の情報とともにその選択の根拠を試験報告書にも記載すべきである。<sup>†4</sup>

様々な大きさのモータとの接続が意図されているがどのモータでの試験が不利となりそうかを判断することが難しいような場合、最小と最大のモータでの試験を行なうという判断もあるかも知れない。

<sup>†3</sup> EMC の側面を含め、必要なスキルを持った個人や組織。

<sup>†4</sup> 試験を外部の試験所に依頼する場合、これらの情報は試験のために必要となるその他の情報とともに試験計画書 (テスト・プラン) に記載すべきであろう。

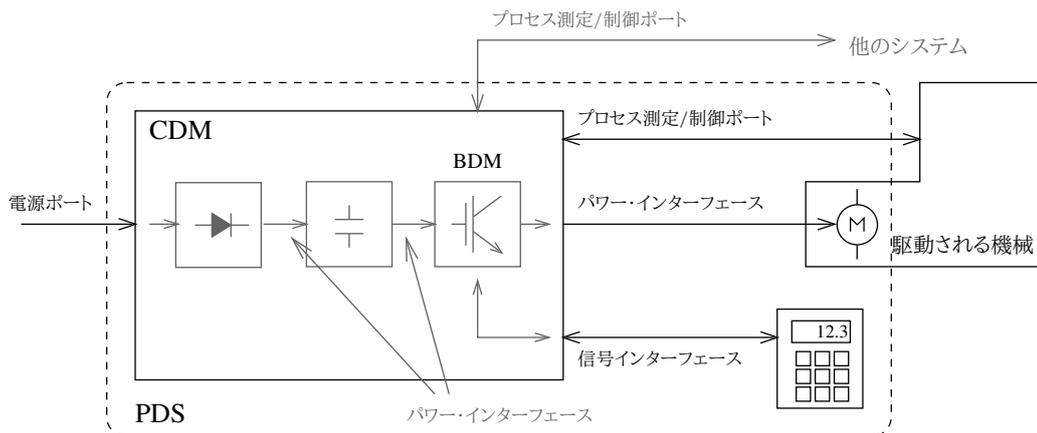


図 1: 可変速駆動システムの構成のイメージ

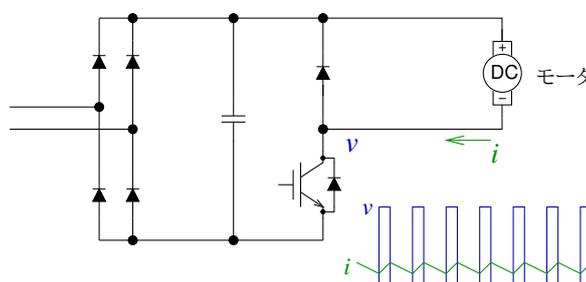


図 3: 可変速駆動システムの原理の例 — DC チョッパ

モータに適当な機械的負荷を掛けることも必要となるかも知れない<sup>†5</sup>が、それで実際の使用で想定される最も不利な状況を代表できるのであれば無負荷での試験も許容できる。

通常は製造業者が指定したモータに製造業者が規定したケーブルと接地方法で接続して試験するが、製造業者がそれを許容する場合にはモータの代わりに受動的な試験負荷を用いても良い。<sup>†6</sup>

モータは必要であれば別に評価されている筈であるので、モータ (センサを除く) そのものをこの規格で試験し直す必要はない。

イミュニティ試験に際して、性能 (例えばトルク) の確認、通信動作の模擬などのために他の機器が必要な場合、それは十分なイミュニティを持つものでなければならない。

<sup>†5</sup> トルク発生時の挙動の確認が必要な場合、トルクへの電磁妨害の影響を測定できるだけの負荷が必要となるかも知れない。また、モータへの機械的負荷やモータの加速/減速のパターンなどによって消費電流が有意に変化し、これが EMC 試験の結果に有意に影響するかも知れない。

<sup>†6</sup> 高周波エミッション測定では例えばモータの巻線とケースのあいだのキャパシタンスを通して流れる高周波電流やモータのケースからの放射がエミッションの測定結果に顕著に影響する可能性があるが、受動的な試験負荷はこの状況を適切に模擬しないかも知れず、従ってそのような負荷での試験は適切ではないかも知れない。

### 3.2 補足

- PDS はしばしば著しく高いノイズを発生し、これが試験器 (イミュニティ試験器を含む) に、また試験の結果に悪影響を与える可能性も考えられる。

パワー・インターフェース・ケーブルや適切にフィルタされていない電源ケーブルには特に注意が必要となるかも知れない。

- 電力回生機能を持つ PDS の試験では電源への接続に注意が必要となるかも知れない。<sup>†7</sup>

<sup>†7</sup> PDS が制動時に余剰の力学的エネルギー (運動エネルギーや位置エネルギー) を回収して電源に戻す場合、電力が通常と逆に PDS から電源に向けて流れる状態が生じる。試験時に電源として交流安定化電源が用いられることがあるが、安定化電源は電力の逆流 (逆潮流) に耐えられないものが多く、このような PDS を接続して動作させると異常動作や損傷を生じるかも知れない。また、商用電源から給電する場合、このような PDS の接続のためには電力会社との協議が必要となるかも知れない。

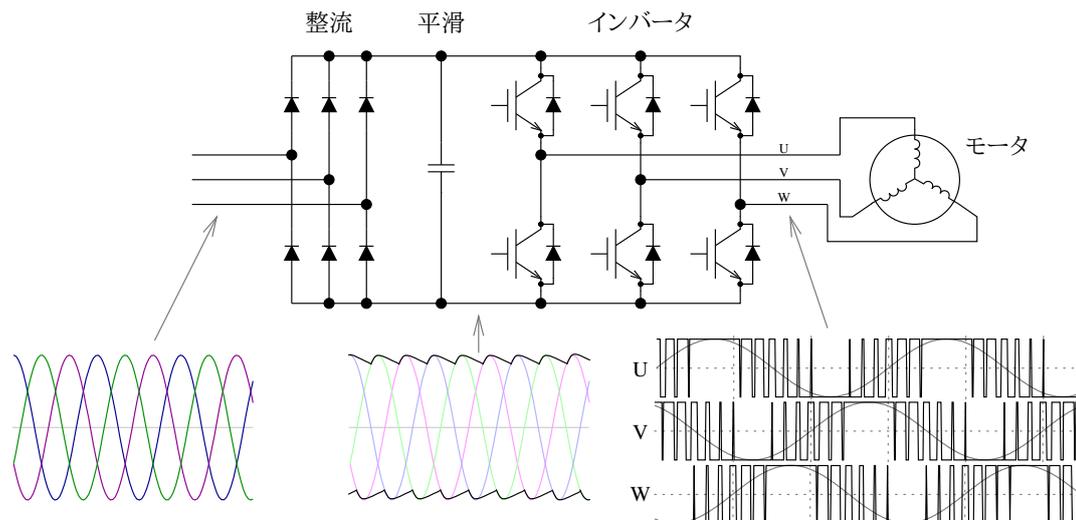


図 4: 可変速駆動システムの原理の例 — 電圧形コンバータ

## 4 イミュニティ要求

### 4.1 性能判定基準

PDS に適用される性能判定基準の枠組みを表 1 に示す。

性能判定基準 A では PDS は仕様の範囲内で正常に機能することが必要となるが、試験に際して実際にどの仕様を確認するか、またその確認の方法や判定で使用する許容幅などは、試験に先立って製造業者が決めることが必要となるだろう。

トルク発生時の挙動の確認はそれが製品仕様に含まれる場合に必要となり、この確認はトルクメータを用いて直接、あるいは電流（一般にコンバータの出力電流はトルクを示すものとみなせる）や速度（慣性が規定されている場合）から間接的に行なうことができる。<sup>†8</sup>

この規格はサブ・コンポーネントの適合性評価のための使用は意図していないが、PDS が大きすぎるなどの理由で試験サイトで動作させられない場合はサブ・コンポーネントの性能を用いてサブ・コンポーネントで試験することもできる。

### 4.2 イミュニティ試験レベル

第 1 種環境や第 2 種環境での使用が意図された低圧 PDS に対するイミュニティ試験レベル

<sup>†8</sup> 仕様にトルクに関する規定が含まれる場合、規定されたトルクが維持されているかどうかの確認が必要となるだろう。慣性が既知であればトルクは加速度から求めることもできる。

を表 2 と表 3 に示す。

また、定格 1000 V を超える PDS に対する低周波イミュニティ試験レベル（高周波イミュニティ試験レベルは低圧 PDS に対するものと共通）を表 4 に示しておくが、以下の説明では定格 1000 V を超える PDS には踏み込まない。

低周波イミュニティ要求（表 2, 表 4）への適合性は、試験、計算、あるいはシミュレーションによって示すことができる。特に大型の PDS では試験での確認は困難となり、計算やシミュレーションでの立証、あるいはそのような手段の併用が不可欠となるかも知れない。

### 4.3 低圧 PDS の試験に関する補足

以下では表 2 と表 3 で示した低圧 PDS に対するイミュニティ要求についての補足を示す。

低周波イミュニティ（表 2）の多くについては試験法が明確に定められておらず、それらの要求への適合性を試験によって示そうとする場合、事前に具体的な試験法を決めることも必要となりそうである。

高周波イミュニティ（表 3）、及び AC 電源のディップ/短時間停電については IEC 61000-4 シリーズで試験法が規定されており、該当する規格に従って試験を行なうことができる。IEC 61000-4 シリーズの主な試験法については [10] で解説しているので、それらについてはここでは追加のポイントのみを示す。

項目	性能判定基準 <sup>a</sup>		
	A	B	C
一般的なシステム性能	動作特性の検知可能な変化がない 規定の許容幅内で意図されたように機能する	動作特性の検知可能な(視覚的、また聴覚的な)変化 自己回復可能	シャットダウン、動作特性の変化 保護デバイスのトリガ <sup>b</sup> 自己回復しない
特別なシステム性能 トルク発生の挙動	規定された許容幅内のトルク偏差	規定された許容幅を超える一時的なトルク偏差 自己回復可能	トルクの喪失 自己回復しない
サブ・コンポーネントの性能 パワー・エレクトロニクスと駆動回路の動作	電力半導体の誤動作がない	PDS の意図しないシャットダウンを引き起こし得ない一時的な誤動作	シャットダウン、保護デバイスのトリガ 格納されたプログラムの喪失がない ユーザー・プログラムの喪失がない 設定の喪失がない 自己回復しない
サブ・コンポーネントの性能 情報処理、及び検出機能	外部デバイスとの通信やデータ交換が妨害されない	通信が一時的に妨害されるが、シャットダウンを引き起こし得る内部や外部のデバイスのエラー報告がない	通信のエラー、データや情報の喪失 格納されたプログラムの喪失がない ユーザー・プログラムの喪失がない 設定の喪失がない 自己回復しない
サブ・コンポーネントの性能 表示、制御部の動作	表示される情報の変化がなく、LED の光度の僅かな変化、あるいは文字の僅かな移動のみ	情報の目視可能な一時的な変化、望ましくない LED の点灯	シャットダウン、情報の恒久的な喪失、あるいは許容されない動作モード、明らかに誤った表示情報 格納されたプログラムの喪失がない ユーザー・プログラムの喪失がない 設定の喪失がない

<sup>a</sup> 性能判定基準 A, B, C — 誤始動は許容されない。誤始動はモータを動作させ得る論理状態「停止中」からの意図しない変化である。

<sup>b</sup> 性能判定基準 C — 機能はオペレータの関与(手動リセット)によって回復できる。逆変換モード(回生モード)で動作している相整流コンバータ(line-commutated converter)についてはヒューズの熔断が許容される。

表 1: 性能判定基準

試験	試験レベル		判定基準
	第 1 種環境	第 2 種環境	
電源ポート — 低周波イミュニティ			
高調波 (THD) 個別高調波	THD 8 % IEC 61000-4-13 Class 2 (表 5)	THD <b>12 %</b> IEC 61000-4-13 <b>Class 3</b> (表 5)	A A
転流ノッチ	—	深さ <b>40 %</b> 、面積 <b>250 % degrees</b>	A
電圧偏差 (> 60 s)	±10 %	±10 %	A
ディップ/短時間停電 (IEC 61000-4-11, -4-34)	0 % 1 サイクル 70 % 25/30 サイクル (50/60 Hz) 0 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	0 % 1 サイクル <b>40 % 10/12 サイクル</b> (50/60 Hz) 70 % 25/30 サイクル (50/60 Hz) <b>80 % 250/300 サイクル</b> (50/60 Hz) 0 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C C C C
電圧不平衡	逆相分 2 %	逆相分 <b>3 %</b>	A
周波数変動	±2 %	±2 % 公共配電網から分離された電源では ±4 %	A
周波数変化率	±1 %/s	±1 %/s 公共配電網から分離された電源では ±2 %/s	A

表 2: 低圧 PDS 低周波イミュニティ試験レベル

試験	試験レベル		判定基準
	第 1 種環境	第 2 種環境	
エンクロージャ・ポート			
IEC 61000-4-2	接触: ±4 kV 気中: ±8 kV	接触: ±4 kV 気中: ±8 kV	B B
IEC 61000-4-3	80 MHz ~ 1 GHz: 3 V/m 1.4 ~ 2 GHz: 3 V/m 2 ~ 2.7 GHz: 1 V/m	80 MHz ~ 1 GHz: <b>10 V/m</b> 1.4 ~ 2 GHz: 3 V/m 2 ~ 2.7 GHz: 1 V/m	A A A
電源ポート (DC 60 V 未満の補助 DC 電源ポートを除く)			
IEC 61000-4-4	±1 kV (5 kHz)	<b>±2 kV</b> (5 kHz)	B
IEC 61000-4-5	ライン-ライン: ±1 kV ライン-接地: ±2 kV	ライン-ライン: ±1 kV ライン-接地: ±2 kV	B B
IEC 61000-4-6	0.15 ~ 80 MHz: 3 V	0.15 ~ 80 MHz: <b>10 V</b>	A
パワー・インターフェース			
IEC 61000-4-4	±1 kV (5 kHz)	<b>±2 kV</b> (5 kHz)	B
信号インターフェース			
IEC 61000-4-4	±0.5 kV (5 kHz)	<b>±1 kV</b> (5 kHz)	B
IEC 61000-4-6	0.15 ~ 80 MHz: 3 V	0.15 ~ 80 MHz: <b>10 V</b>	A
プロセス測定/制御線、DC 60 V 未満の補助 DC 電源ポート			
IEC 61000-4-4	±0.5 kV (5 kHz)	<b>±2 kV</b> (5 kHz)	B
IEC 61000-4-5	—	ライン-接地: <b>±1 kV</b> (1.2/50 μs - 8/20 μs)	B
IEC 61000-4-6	0.15 ~ 80 MHz: 3 V	0.15 ~ 80 MHz: <b>10 V</b>	A

表 3: 高周波イミュニティ試験レベル

試験	試験レベル	判定基準
主電源ポート		
高調波 ( $\geq 15$ s)	IEC 61000-2-4 Class 3 (表 8)	A
高調波 ( $< 15$ s)	IEC 61000-2-4 Class 2 の 1.5 倍	A
転流 ノッチ	深さ 40 %、面積 125 % degrees	A
電圧偏差 ( $> 60$ s)	$\pm 10$ %	A
電圧偏差 ( $\leq 60$ s)	+10 % to -15 %	A
ディップ/短時間停電 (IEC 61000-4-11, -4-34)	0 % 1 サイクル	C
	40 % 10/12 サイクル (50/60 Hz)	C
	70 % 25/30 サイクル (50/60 Hz)	C
	80 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C
	0 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C
電圧不平衡	逆相分 2 %	A
周波数変動	$\pm 2$ % 公共配電網から分離された電源では $\pm 4$ %	A
周波数変化率	$\pm 1$ %/s 公共配電網から分離された電源では $\pm 2$ %/s	A
補助電源ポート		
高調波 (THD)	THD 12 %	A
個別高調波	IEC 61000-4-13 Class 3 (表 5)	A
転流 ノッチ	深さ 40 %、面積 250 % degrees	A
電圧偏差 ( $> 60$ s)	$\pm 10$ %	A
電圧偏差 ( $\leq 60$ s)	+10 % to -15 %	A
ディップ/短時間停電 (IEC 61000-4-11, -4-34)	0 % 1 サイクル	C
	40 % 10/12 サイクル (50/60 Hz)	C
	70 % 25/30 サイクル (50/60 Hz)	C
	80 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C
	0 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C
電圧不平衡	逆相分 3 %	A
周波数変動	$\pm 2$ % 公共配電網から分離された電源では $\pm 4$ %	A

表 4: 1000 V を超える PDS の低周波イミュニティ試験レベル

#### 4.3.1 高調波

この試験は電源電圧の高調波歪みの影響を評価するものであり、個別高調波試験では電源電圧に表 5 で示すような整数次の高調波電圧を重畳させた状態で EUT を動作させた時、所定の性能判定基準を満足し、またフィルタなどの入力回路の定格を超過しないことを確認する。<sup>i9</sup>

この試験で適用すべき試験法は規定されておらず、それぞれの妨害をどれだけの時間印加すべきかも示されていないが、定格 16 A までの機器には IEC 61000-4-13<sup>[4]</sup> の試験法を適用できる旨が述べられている。IEC 61000-4-13 では、最終的な電圧

<sup>i9</sup> IEC 61800-3:2017 Table 4 では第 2 種環境については偶数次高調波は 50 次までの試験レベルが示されているが、参照されている IEC 61000-4-13 では 40 次までとなっており、また IEC 61800-3 Table 4 でも奇数次については 39 次までしか示されていないので、これは 40 次までの誤りと思われる。

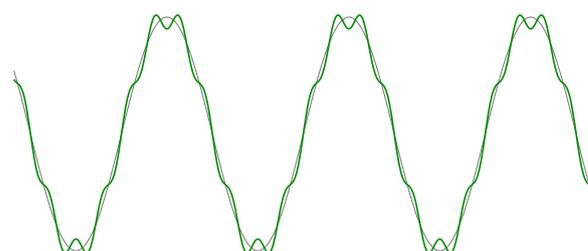


図 5: 高調波が重畳された波形の例 (7 次、12 %)

波形の実効値を一定に保ちながら、高調波を 5 秒間重畳、高調波の重畳を 1 秒間停止、次の周波数の高調波を 5 秒間重畳、... のようにすると定められており、機器の定格と無関係にその手順を準用することを考えても良いかも知れない。

特に高調波の周波数で回路が共振 (例えば電源や電源フィルタのインダクタンスと電源入力段のコン

デンサの直列共振)を生じた場合など、特定の周波数で回路に過大な電流が流れたり<sup>†10</sup>異常な電圧を生じたりして問題を引き起こす可能性も考えられる。

このような共振の可能性がある場合、必要に応じて電源のインピーダンスを模擬するインピーダンスを追加し、電流や電圧を監視しながら、また IEC 61000-4-13 での試験手順に準じて整数次の高調波のみでなく周波数掃引を行なって確認を行なう価値もあるかも知れない。

THD<sup>†12</sup>については THD の値のみが示されており、具体的な試験条件(試験に際してどの次数の高調波をどれだけ印加すべきか、など)は示されていない。PDS は THD と個別高調波の試験レベルを超えない範囲での任意の高調波の組み合わせに耐えるべきであろうが、実際に試験を行なうためにはその条件を満たす無数の候補の中から具体的な試験条件を選択することが必要となる。

IEC 61000-4-13 の試験手順では、組み合わせ高調波、すなわちフラット・カーブ(表 6, 図 7)とオーバー・スイング(表 7, 図 8)での試験が最初となるので、この試験を、必要であれば THD が所定の値となるように修正した上で行なうことを考えても良いかも知れない。<sup>†13</sup>

#### 4.3.2 転流ノッチ

転流ノッチ(コミュレーション・ノッチ)は主にサイリスタ整流回路の転流に際しての相間の一時的な短絡に伴って生じ、例えば図 9 のような波形となる。<sup>†14</sup>

この規格では、第 2 種環境での使用が意図された PDS についてのみ、深さ 40 % (正弦波のピーク電

<sup>†10</sup> 例えば電源系統のインピーダンス  $Z = (0.24 + j0.15) + (0.16 + j0.10) \Omega$ <sup>†11</sup>の場合でも、入力段のコンデンサが  $10 \mu\text{F}$  であれば約  $1.8 \text{ kHz}$  ( $50 \text{ Hz}$  の約 36 倍)で直列共振を生じ、コンデンサに共振を生じていない場合の 10 倍以上の電流が流れる計算となる。直列共振状態での電流はその経路のレジスタンス成分で支配され、電源容量が大きい場合などはレジスタンスが相当小さくなり、従って著しく大きい電流が流れる可能性も予期される。

<sup>†11</sup> これは IEC 61000-4-13 で示唆されている値で、IEC 61000-3-3 の  $Z_{\text{ref}}$  の値と同一である。

<sup>†12</sup> この規格では THD (total harmonic distortion; 総高調波歪) は  $Q_h$  を  $h$  次の高調波成分として  $THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (Q_h/Q_1)^2}$  と定義されている。

<sup>†13</sup> IEC 61000-4-13 で示されている試験レベルでは THD が 12 % に達していないので、参考のため、表 6 と表 7 には THD が 12 % となるようなパラメータの例も追記している。

<sup>†14</sup> 転流ノッチに関しては §5.1 も参照。なお、実際の波形は激しいオーバーシュートやリングングを伴うことが予期される。

次数	試験レベル (%)	
	第 1 種環境	第 2 種環境
	IEC 61000-4-13 Class 2	IEC 61000-4-13 Class 3
2	3	5
3	8	9
4	1.5	2
5	9	12
$6 \leq h \leq 50$ の偶数次	—	1.5
7	7.5	10
9	2.5	4
11	5	7
13	4.5	7
15	—	3
17	3	6
19	2	6
21	—	2
23	2	6
25	2	6
27	—	2
29	1.5	5
31	1.5	3
33	—	2
35	1.5	3
37	1.5	3
39	—	2

表 5: 低圧 PDS 個別高調波イミュニティ試験レベル

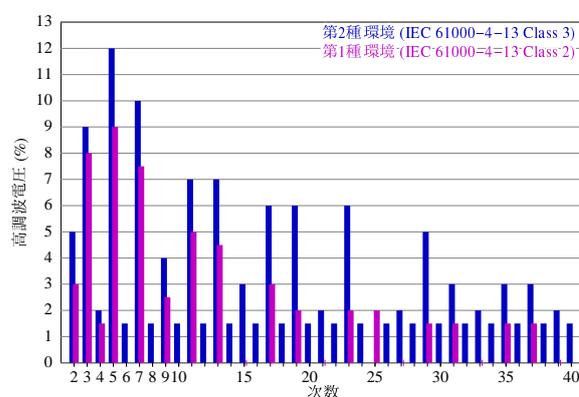


図 6: 低圧 PDS 個別高調波イミュニティ試験レベル

圧に対する割合)、面積 250 % degrees のノッチに対するイミュニティが要求されている(表 2, 図 10)。

この試験では、そのようなノッチを生じさせた電源波形で動作させた時、所定の性能判定基準を満足し、またフィルタなどの入力回路の定格を超えないことを確認する。<sup>†15</sup>

<sup>†15</sup> 例えば、電源が  $230/400 \text{ V}$   $50 \text{ Hz}$  の場合、40 % 250 % degrees のノッチでの試験では高さ  $130 \text{ V}$  (ライン - ラインの電圧では  $260 \text{ V}$ )、パルス幅  $0.35 \text{ ms}$  の矩形波のような波形を電源波形に重畳したような状態となる。これは電源入力段のコンデンサなどの素子に過大なストレスを与えるかも知れず、そのような可能性がある場合は関係する部品の定格を超えていないことを確認できるような形で試験が必要となるかも知れない。

次数	IEC 61000-2-4 両立性レベル (%)	
	Class 2	Class 3
THD	8	10
5	6	8
7	5	7
11	3.5	5
13	3	4.5
17	2	4
17 < h ≤ 49 の 3 の整数倍以外	$2.27 \times (17/h) - 0.27$	$4.5 \times (17/h) - 0.5$
3	5	6
9	1.5	2.5
15	0.4	2
21	0.3	1.75
21 < h ≤ 45 の 3 の整数倍	0.2	1
2	2	3
4	1	1.5
6	0.5	1
8	0.5	1
10	0.5	1
10 < h ≤ 50 の偶数次	$0.25 \times (10/h) + 0.25$	1

表 8: IEC 61000-2-4 高調波電圧両立性レベル (表 4 参照)

クラス	平坦部のレベル	THD
1	0.95	1.9 %
2	0.9	4.2 %
3	0.8	9.0 %
X	0.74	11.8 %
	0.73	12.3 %
	⋮	⋮

表 6: IEC 61000-4-13 フラット・カーブ試験波形のパラメータと THD

クラス	3 次高調波	5 次高調波	THD
1	4 % / 180°	3 % / 0°	5.0 %
2	6 % / 180°	4 % / 0°	7.2 %
3	8 % / 180°	5 % / 0°	9.4 %
X	9 % / 180°	8 % / 0°	12.0 %
	9 % / 180°	9 % / 0°	12.7 %
	⋮	⋮	⋮

表 7: IEC 61000-4-13 オーバー・スイング試験波形のパラメータと THD

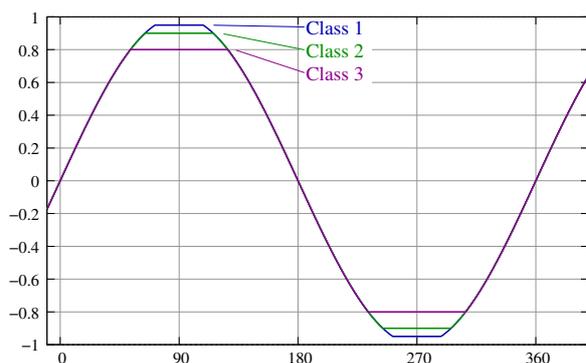


図 7: IEC 61000-4-13 フラット・カーブ試験波形

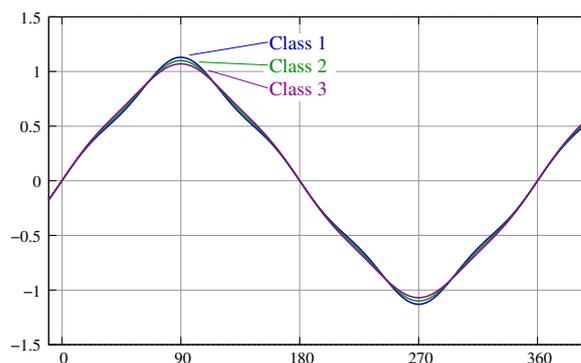


図 8: IEC 61000-4-13 オーバー・スイング試験波形

この試験でノッチを波形のどの位置で生じさせるかは規定されておらず、また実際の転流ノッチがどの位相角で生じるかは発生源となる回路の動作 (これは動作に伴って変化するかも知れない) に依存するが、制御位相角<sup>†16</sup> $\alpha$  を 30° と、すなわちライン

<sup>†16</sup> ダイオードの自然な転流ポイント、すなわち相の電圧が等しくなるポイントに対する点弧角の遅れ (図 15, 図 16)。なお、

— 中性線電圧波形の 0°、60°、180°、及び 240° でノッチが発生すると仮定した場合の電圧波形の例

ノッチの深さは関係する 2 つの相のあいだの電圧の差に依存するので、電圧の差が小さくなる  $\alpha = 0^\circ$  付近では深いノッチの発生は予期されない。

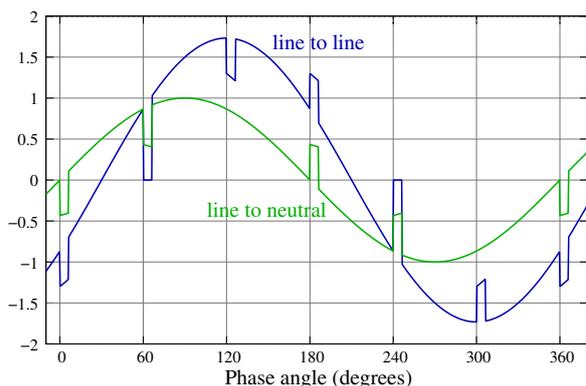


図 9: IEC 61800-3 転流 ノッチ試験波形の例

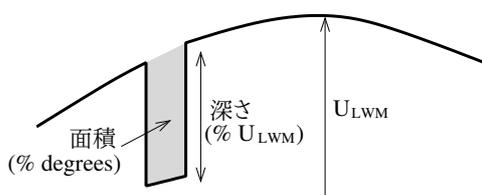


図 10: ノッチのパラメータ

を図 9 に示している。<sup>†17†18</sup>

印加時間の規定もないが、参考情報ではあるものの、この規格の付属書 B (参考) には 1 時間を超える必要はない旨の記載がある。

#### 4.3.3 電圧偏差

この試験は電源電圧の公称値からのずれの影響を評価するものである。PDS はその範囲内の電源電圧で正常に動作しなければならないが、電圧が公称電圧よりも低い場合、最大出力定格 (速度、及び/もしくはトルク) は低下しても良い。

3 相 PDS の場合、電圧偏差は 3 相全てに一括で生じさせる。実際の電源は相によって電圧が異なる状態となる可能性もあるが、これは電圧不平衡 (§4.3.5) で評価される。

<sup>†17</sup> 図 9 ではノッチの底が関係する 2 つの相の電位の平均値のカーブに沿うような形で図示しているが、ノッチの底を一定電圧としたカーブとしてもこの試験の目的のためには充分だろうし、その方が簡単かも知れない。

<sup>†18</sup> この位相角を少し前後にずらせば、ライン - 中性線、あるいはライン - ラインの電圧波形に余計なゼロ・クロスを生じるようになる。PDS にゼロ・クロス検出回路が内蔵されている場合のように、電圧波形の余計なゼロ・クロスが好ましくない影響を生じる可能性が予期される場合、余計なゼロ・クロスを意図的に生じさせた波形で試験する価値があるかも知れない。

#### 4.3.4 ディップ/短時間停電

電源電圧のディップや短時間停電の PDS への影響を確認するもので、定格 16 A 以下の PDS には IEC 61000-4-11 が、定格 16 を超える PDS には IEC 61000-4-34 が適用可能である。短時間停電の際の PDS の挙動は、通常の動作条件で主電源のオフ/オンを行なうことでも確認できる。<sup>†19</sup>

性能判定基準は全ての条件で C<sup>†20</sup> となっており、逆変換モード<sup>†21</sup>で動作している相整流コンバータ (line-commutated converter) についてはヒューズの熔断も許容される。

3 相 PDS の場合、ディップ試験ではそれぞれのライン - 中性線 ( $L_n-N$ )、及びそれぞれのライン - ライン ( $L_n-L_n$ ) の電圧をディップさせる。<sup>†22</sup>

ディップや短時間停電による性能の低下は製造業者が規定し、ユーザー向け文書に記載する。この規格ではディップ/短時間停電の後での動作 (例えば、自動的に動作を再開する、停止状態とする、など) の規定もないが、これも必要に応じて製造業者が規定し、ユーザー向け文書に記載すべきであろう。

<sup>†19</sup> ディップや短時間停電からの復電の際の突入電流は著しく大きくなることもあり、試験で使用する試験発生器 (電源) がその突入電流を制限しないことが必要となる。IEC 61000-4-11 では、試験発生器の突入電流供給能力が、定格 100 ~ 120 V では 250 A、定格 200 ~ 240 V では 500 A、定格 250 ~ 600 V では 1000 A 以上であることが、あるいは EUT の突入電流が試験発生器の突入電流供給能力の 70 % 未満であることが要求される。また、IEC 61000-4-34 では、試験発生器の突入電流供給能力が、定格 16 ~ 50 A では 500 A 以上、定格 50 ~ 100 A では 1000 A 以上、定格 100 A を超える場合は 1000 A 以上かつ電圧を  $\pm 10\%$  に維持できることが要求される。機器の設計では、通常の電源投入時のみでなくディップや短時間停電からの復電の際の突入電流も適切に抑制するとともに、予期される最大突入電流を把握しておくことが望ましい。

<sup>†20</sup> 性能判定基準は §4.1 を参照。この規格では任意のディップに対して C が許容されるものの、通常は PDS は機器やシステムの一部として用いられ、その機器やシステムは例えば 0 % 1 サイクルか 0 % 0.5 サイクルのディップに対しては動作を継続することが必要となるかも知れないので、想定される最終的な機器やシステムに対する要件の考慮も必要となるかも知れない。

<sup>†21</sup> 通常の動作と逆に、負荷側から電源入力側に電力を戻している状態。相整流コンバータ (line-commutated converter) はサイリスタなどを用いて変換を行ないながら電源から負荷に電力を伝えるが、逆に負荷側から電源入力側に電力を戻す機能 (電力回生機能) を持つ場合がある。PDS では制動時にモータを発電機として機能させて電気エネルギーとして回収した余剰の力学的エネルギー (運動エネルギーや位置エネルギー) を回生抵抗で消費させる代わりに電源に戻してそのエネルギーを他で再利用できるようにするためにこの機能が用いられることがある。

<sup>†22</sup> コンデンサ・インプット型整流平滑回路が用いられている場合などは、3 相電源のディップに際してディップしていない相の電流が著しく増加する可能性がある (図 13)。

### 4.3.5 電圧不平衡

この試験は図 11 や図 12 で示すような 3 相電源の相電圧の不平衡、すなわち各相の電圧の振幅や位相角のずれの影響を確認するものである。

この規格では IEC 61000-2-2 や IEC 61000-2-4 で両立性レベルとして示されている逆相分<sup>†23†24</sup>の値がそのまま試験レベルとして引用されているだけで、逆相分は各相の振幅や位相角によって決まるものの、どのような振幅や位相角での試験を行なうべきかの情報はない。

PDS は逆相分が規定された値を超えない範囲での任意の振幅と位相角の組み合わせに対して正常に機能すべきであろうが、実際に試験を行なうためにはその条件を満たす無数の候補の中から具体的な試験条件を選択することが必要となる。逆相分の値だけでは試験条件を決めにくい、IEC 61000-4-27<sup>[5]</sup> (この規格からは参照されていない) では表 9 に示すような逆相分がこれを超える試験レベルが規定されており、この試験条件を準用しても良いかも知れない。

クラス	試験	試験レベル	印加時間	逆相分
Class 2	test 1	100 % 0° 95.2 % 125° 90 % 240°	30 s	6 %
	test 2	100 % 0° 90 % 131° 80 % 239°	15 s	13 %
	test 3	110 % 0° 66 % 139° 71 % 235°	0.1 s	25 %
Class 3	test 1	100 % 0° 93.5 % 127° 87 % 240°	60 s	8 %
	test 2	100 % 0° 87 % 134° 74 % 238°	15 s	17 %
	test 3	110 % 0° 66 % 139° 71 % 235°	2 s	25 %

表 9: IEC 61000-4-27 電圧不平衡イミュニティ試験レベル

試験では、PDS を定格負荷条件で動作させ、30 s ± 5 s のあいだ電圧不平衡を発生させる。

<sup>†23</sup> 逆相分は逆方向に回転する成分であり、3 相電源で直接駆動される電動機でしは問題となる。

<sup>†24</sup> オペレータ  $a = e^{i120^\circ}$  (位相を 120° 回転させる作用を持つ) として、正相電圧  $U_1 = (U_A + aU_B + a^2U_C)/3$ 、逆相電圧  $U_2 = (U_A + a^2U_B + aU_C)/3$ 、パーセントで表現される逆相分は正相電圧に対する逆相電圧の比率で  $\tau \% = 100U_2/U_1$  である。

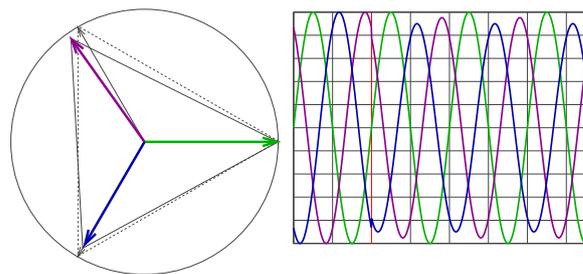


図 11: 電圧不平衡の例 (IEC 61000-4-27 Class 2 Test 1)

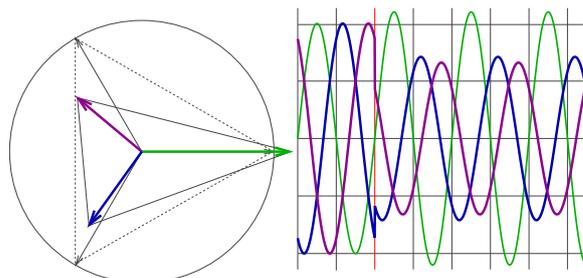


図 12: 電圧不平衡の例 (IEC 61000-4-27 Class 2 Test 3)

コンデンサ・インプット型整流平滑回路が用いられている場合など、電圧不平衡試験に際して電圧が高い相の電流が著しく増大する可能性もあり (図 13)、そのような場合には試験で使用する電源はその電流を供給できることが必要となる。

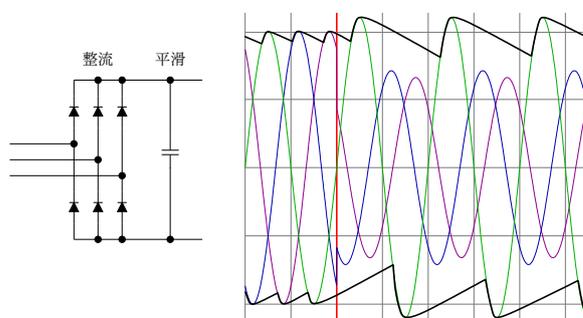


図 13: 著しい電圧不平衡時のコンデンサ・インプット型整流平滑回路の動作のイメージ — 電力全てが緑の相から供給され、従ってその相の電流は増大している

### 4.3.6 周波数変動

電源周波数の変動の影響を確認するものであり、この規格では周波数偏差、及び周波数変化率が規定されているが、具体的な試験法の記載はない (表 2)。

IEC 61000-4-28<sup>[6]</sup> (この規格からは参照されていない) では、図 14 のように、 $f + \Delta f$  への変動を 3 回、 $f - \Delta f$  への変動を 3 回、60 秒の間隔を置いて

行なうシーケンスが規定されており、この試験法を準用しても良いかも知れない。

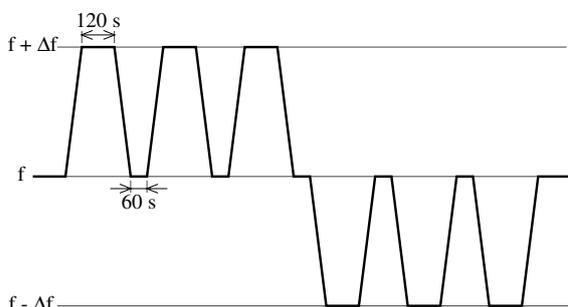


図 14: 周波数変動試験のシーケンスの例 (IEC 61000-4-28)

試験では、PDS は定格負荷条件で動作させる。

交流電源が整流回路の入力としてのみ用いられている場合は特に、数パーセントの周波数変動はほとんど問題とならないであろう。

#### 4.3.7 IEC 61000-4-3 (放射電磁界)

- 大型の PDS<sup>†25</sup> は PDS 全体を試験する代わりに敏感なサブ・コンポーネントを試験しても良い。
- モータが試験サイトで動作させるためには大き過ぎる場合、悪影響がないならばより小さいものに置き換えて良い。
- 妨害は 1 kHz 80 % AM で変調する。
- ドウェル・タイムは、機器が動作し、その妨害に反応するのに十分な時間としなければならない。<sup>†26</sup>
- ラックやキャビネットに組み込むことが意図された機器はその状態で試験することができる。<sup>†27</sup>

<sup>†25</sup> 定格電圧が 500 V を超える、定格電流が 200 A を超える、総質量が 250 kg を超える、あるいは高さ、幅、または奥行きが 1.9 m を超える PDS。

<sup>†26</sup> 各周波数の妨害は、あらかじめ決定されたドウェル・タイム (dwell time) のあいだ印加される。動作サイクルが長い、間欠的に動作する機能がある、あるいは妨害への反応が遅い (例えば時定数の長いフィルタが関係する)、評価の対象となる機能がある場合、それに応じてドウェル・タイムを長くすることが必要となるだろう。そのような場合、試験時間を抑えるため、評価の対象となる機能を短いドウェル・タイムで評価できるようにする試験用のソフトウェアの用意などを考える価値があるかも知れない。

<sup>†27</sup> 機器をキャビネットに入れて試験する場合、使用するキャビネットやそれにどのように組み込むかが試験の結果に顕著に

#### 4.3.8 IEC 61000-4-4 (電氣的ファスト・トランジェント / パースト)

- 電源ポート以外についてはケーブル長が 3 m を超えるかも知れない場合にのみ適用。
- 電源ポートの試験は、定格 100 A 未満であれば CDN による直接注入で、定格 100 A 以上であれば減結合回路網なしでの直接注入か試験レベルを 2 倍としての容量性結合クランプでの結合によって行なう。
- 試験では、EUT を基準接地面から 0.1 m の高さに置くこと、妨害の注入のためのデバイスを EUT から 0.5 m の距離に取り付けることなどが必要で、そのラックやキャビネットが PDS の一部となるのでない限り、ラックやキャビネットに組み込むことが意図された機器もラックやキャビネットに組み込まずに試験することが必要となるだろう。

#### 4.3.9 IEC 61000-4-5 (サージ)

- 電源ポートについては軽負荷条件で 63 A 未満となる場合にのみ適用。
- 電源ポート以外についてはケーブル長が 30 m を超えるかも知れない場合にのみ適用。

#### 4.3.10 IEC 61000-4-6 (RF 電磁界によって誘導された伝導性妨害)

- 大型の PDS<sup>†25</sup> は PDS 全体を試験する代わりに敏感なサブ・コンポーネントを試験しても良い。
- モータが試験サイトで動作させるためには大き過ぎる場合、悪影響がないならばより小さいものに置き換えて良い。
- 妨害は 1 kHz 80 % AM で変調する。
- ドウェル・タイムは、機器が動作し、その妨害に反応するのに十分な時間としなければならない。<sup>†26</sup>

影響することが予期される。その機器の実際の使用に際して所望のイミュニティを期待できるようにするためには、ユーザーへの情報 (§6) も考慮して、その機器の実際の使用を代表する最も不利な条件で試験することが必要となるだろう。

- 電源ポート以外についてはケーブル長が 3 m を超えるかも知れない場合にのみ適用。
- 試験では、EUT を基準接地面から 0.1 m の高さに置くこと、妨害の注入のためのデバイスを EUT から 0.1~0.3 m の距離に取り付けることなどが必要で、そのラックやキャビネットが PDS の一部となるのでない限り、ラックやキャビネットに組み込むことが意図された機器もラックやキャビネットに組み込まずに試験することが必要となるだろう。

## 5 エミッション要求

以下ではカテゴリ C1~C3 の PDS に対するエミッション要求を示す。

カテゴリ C4 の PDS の高周波エミッション測定は設置後に行なわれ、被害者となり得る機器に給電する配電変圧器の 2 次側での伝導エミッション（環境に応じてカテゴリ C1 が C2 と同様の限度を適用）、及び第 1 種環境では設備から 10 m、第 2 種環境では設備から 30 m の距離での 0.15~1000 MHz の放射エミッション（30~1000 MHz はカテゴリ C1 と同様の限度を適用）が評価対象となる。

### 5.1 転流ノッチ

転流ノッチ（コミュテーション・ノッチ）は電源入力部の整流素子の転流（電流の経路の切り替え）に際して一時的に複数の相の整流素子が同時に導通した状態となって相間が短絡されることで生じるもので、主にサイリスタ・ブリッジ整流回路が用いられている場合に懸念となる（図 15, §5.1.1）。

回路の分析から無視できる程度の転流ノッチしか発生しないことがわかっている場合は転流ノッチのエミッションの考慮は不要である。

ダイオード・ブリッジ整流回路（図 16）の場合、転流は関係する 2 つの相の電位がほぼ等しい時に短時間で行なわれるため、原理的に激しい転流ノッチの発生は予期されず、一般に転流ノッチの発生についての考慮は不要となる。

PDS が発生する転流ノッチの評価やその低減のための手法についてはこの規格の付属書 B（参考）で触れられている。

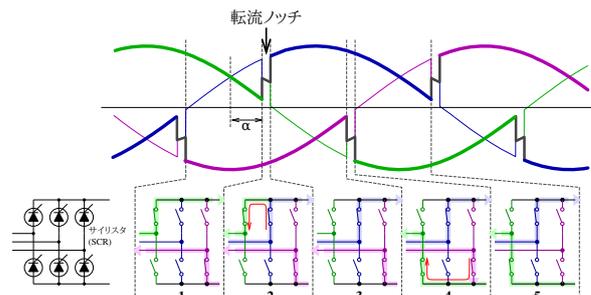


図 15: サイリスタ・ブリッジ整流回路の動作イメージ

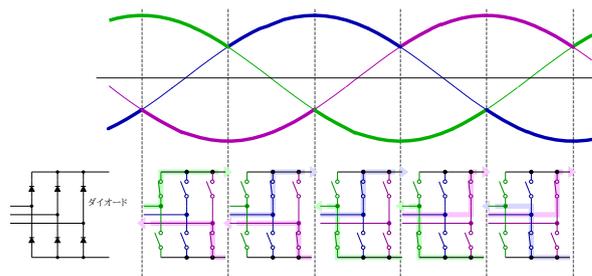


図 16: ダイオード・ブリッジ整流回路の動作イメージ

ノッチの考慮が必要な場合、

- PDS に含まれる減結合リアクタンス、及び緩和のために外部に追加できる減結合リアクタンスの情報をユーザーに提供する。
- ライン・インピーダンスを PDS の定格電力の 1.5 % に相当するインダクタンスと仮定して、PCC<sup>†28</sup> か IPC<sup>†29</sup> におけるノッチの深さを、第 1 種環境では 20 % 以下、第 2 種環境では 40 % 以下に抑えるべき。  
適合性は、計算、シミュレーション、あるいは測定によって示すことができる。
- この推奨に従わない場合、以下の情報を提供すべき：
  - CDM/BDM の正しい動作のための最大/最小ライン・インピーダンス；
  - CDM/BDM に含まれる減結合リアクタンス  $Z_d$  の詳細；

<sup>†28</sup> PCC (point of common coupling; 共通結合点) — 特定の負荷に電氣的に最も近い、他の負荷を接続できる、公共配電網内の点。(補足: 簡単には配電系統から需要家の施設への引き込みのあたりと考えれば良いだろう。図 17 も参照。)

<sup>†29</sup> IPC (in-plant point of coupling; 構内結合点) — 特定の負荷に電氣的に最も近い、他の負荷を接続できる、システムや施設内の電力網の上の点。(補足: 施設内での配電の状況によるが、分電盤のあたりとなるかも知れない。図 17 も参照。)

- オプション品として供給可能な減結合リアクタンス  $Z_d$  の詳細。

### 5.1.1 サイリスタ・ブリッジ整流回路での転流ノッチの発生

サイリスタ・ブリッジ整流回路では、電圧が高くなった相のサイリスタに適切なタイミングでトリガ信号を与えて導通させ、それまで導通していたサイリスタを遮断させることで、図 15 で示すように転流（電流の経路の切り替え）を行なう。

この転流動作に際して、図 15 のステップ 2 や 4 のように一時的に 2 つの相のサイリスタが同時に導通してそれらの相のあいだが短絡された状態を生じ、これが整流回路の入力の電圧波形にノッチを生じさせる。

この動作に伴って発生するノッチの深さは転流のタイミングと関係し、転流が関係する 2 つの相の電圧の差が大きい時に行なわれれば（すなわち図 15 で示した  $\alpha$  が  $90^\circ$  に近付けば）ノッチはより深くなるのが予期される。また、ノッチの幅は整流回路の上流側のインダクタンス（電源システムのインダクタンス、また整流回路の入力側にインダクタを追加した場合にはそのインダクタンス）と関係し、インダクタンスが大きくなればノッチの幅は広がる。

必要な場合、PCC<sup>†28</sup> や IPC<sup>†29</sup> と整流回路の入力とのあいだに適切な減結合リアクタンス（インダクタ）を追加することで PCC や IPC で観測されるノッチの深さを抑えることができる。

## 5.2 電源高調波

以下の規格の対象となる PDS には該当する規格を適用する：

- IEC 61000-3-2<sup>[11]</sup> — 高調波電流エミッションの限度（相当たり  $\leq 16$  A の機器入力電流）<sup>†30</sup>
- IEC 61000-3-12<sup>[11]</sup> — 公共低圧系統に接続される入力電流  $> 16$  A かつ  $\leq 75$  A の機器が発生する高調波の限度

但し、PDS がこれらの規格の対象となる機器に組み込まれる場合、このような規格は PDS 単体ではなく機器全体に適用する。

<sup>†30</sup> 日本国内では JIS C 61000-3-2 が適用可能。

測定は、定格入力電流となる条件<sup>†31</sup>で、あるいはそれよりも低い電流で THC<sup>†32</sup>が最大となるのであればその条件で行なう。<sup>†33</sup>逆変換モード（回生モード）での試験は不要である。

中圧や高圧で受電する施設での使用のみが意図されている場合など、これらの規格を適用しない場合、

- 計算、シミュレーション、あるいは試験によって求めた、定格負荷条件での RMS 電流に対する THC、及び 40 次までの高調波電流を添付文書に記載する；
- 施設全体を考慮した妥当なアプローチを用いるべき；
- その地域や電力会社などで定められたルールやガイドラインなどの考慮が必要となるかも知れない。<sup>†34</sup>

## 5.3 電圧変動/フリッカ

以下の規格の対象となる PDS には該当する規格を適用する：

- IEC 61000-3-3<sup>[12]</sup> — 定格 16 A/相以下で条件付き接続の対象とならない機器の、公共低圧電源系統の電圧変動、電圧動揺、及びフリッカの制限
- IEC 61000-3-11<sup>[12]</sup> — 公共低圧電源系統の電圧変動、電圧動揺、及びフリッカの制限 – 定格 75 A/相以下で条件付き接続の対象となる機器

<sup>†31</sup> この規格の付属書 B（参考）では、電圧形インバータについてはベース・スピードでの駆動状態、サイリスタ DC ドライブや電流形インバータについてはベース・スピードの 66 % という条件も示されている。ここで、ベース・スピードはモータが最大出力を発生できる最低速度である。

<sup>†32</sup> この規格では THC (total harmonic current; 総高調波電流) は 2 次から 40 次の高調波電流の実効値、すなわち  $I_h$  を  $h$  次の高調波電流として  $THC = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}$  と定義されている。

<sup>†33</sup> 実際のモータを用いてこの条件を満たす状態を維持するためにはモータに機械的な負荷を掛ける必要があるかも知れない。

<sup>†33</sup> 例えば 1 kV 以下が低圧 (LV)、1 ~ 35 kV が中圧 (MV)、それよりも高いものが高圧 (HV) のように呼ばれることがある。日本では、600 V 以下が低圧、600 V ~ 7 kV が高圧、それよりも高いものが特別高圧と呼ばれる。

<sup>†34</sup> 例えば、日本では「高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」(経済産業省資源エネルギー庁 原子力安全・保安院)、アメリカでは IEEE 519、UK では ENA ER G5/4-1 など。

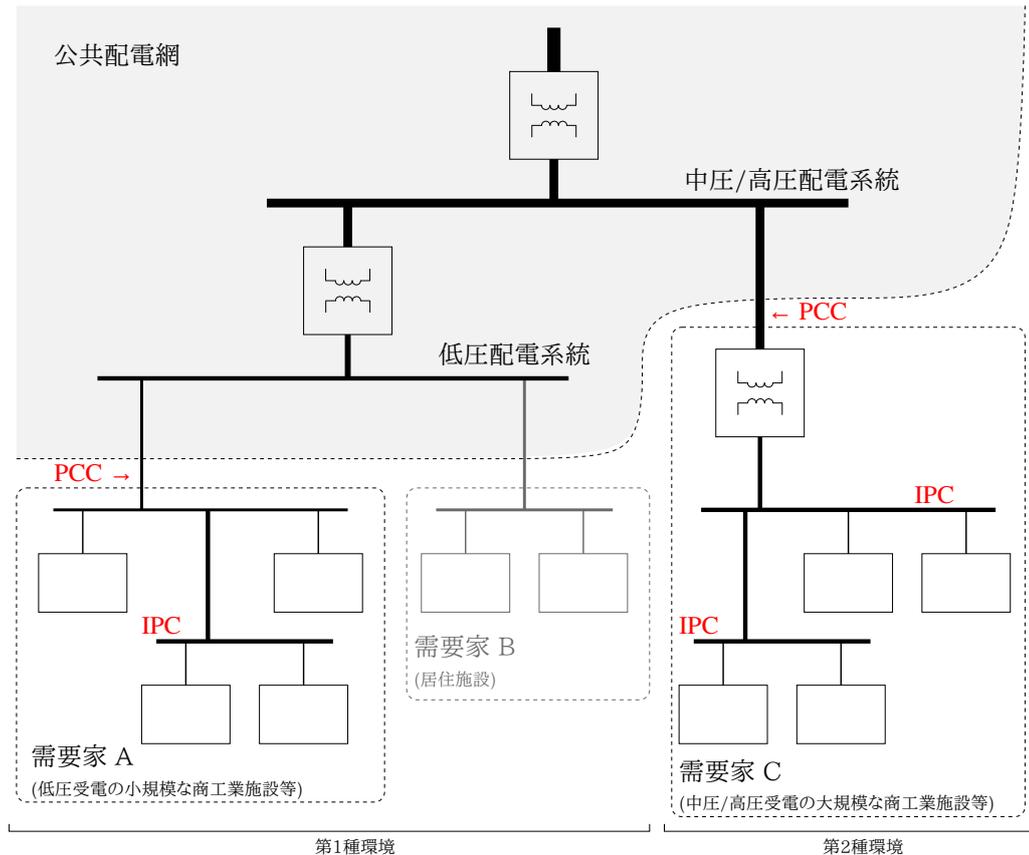


図 17: 電力網と PCC、IPC

但し、PDS がこれらの規格の対象となる機器に組み込まれる場合、このような規格は PDS 単体ではなく機器全体に適用する。

フリッカは電源電流の変動や次数間高調波電流によって生じる。電源電流の変動に伴うフリッカは急激かつ大きな電流変動の変動が頻繁に発生すれば大きくなるので、実際の使用で想定される範囲内で、電流が最大となる条件での駆動と停止（あるいは急加速、駆動停止、逆方向に急加速、駆動停止、... など）をできる限り高い頻度で繰り返すことが最悪条件となるかも知れない。<sup>†35</sup>

中圧や高圧で受電する施設での使用のみが意図されている場合など、これらの規格を適用しない場合も、PCC<sup>†28</sup> や IPC<sup>†29</sup> における電圧フリッカが該当する両立性レベルや目標レベルを超えないように適切な配慮が必要となるかも知れない。<sup>†36</sup>

<sup>†35</sup> 他の条件が等しい場合、電圧変動（電流の変動によって引き起こされる）の繰り返し周波数が 8.8 Hz 前後の時が最もフリッカのレベルが高くなる。<sup>[12]</sup>

<sup>†36</sup> 低圧電源系統については、しばしば、 $P_{st} \leq 1$ 、あるいは  $\Delta V_{10} \leq 0.45$  という基準が適用される。

## 5.4 高周波エミッション

### 5.4.1 共通事項

- 測定は CISPR 11:2015+A1:2016<sup>[8]</sup> に従って行なう。<sup>†37</sup>
- 機器の構成は典型的な使用の範囲内でエミッションが最大となるようにする。
- ケーブルの種類や長さは個々の製品で指定されたものとする。  
長さが可変の場合はエミッションが最大となるような長さを選択し、試験で実際に用いたケーブルの長さを試験報告書に記載する。<sup>†38</sup>
- 負荷は仕様の範囲内とし、試験で実際に使用した負荷を試験報告書に記載する。

<sup>†37</sup> 規格が異なるためかなりの違いがあるものの、測定法や測定で使用する機材などについての一般的な情報は [13] が参考になるかも知れない。

<sup>†38</sup> モータ・ケーブルや適切にフィルタされていない電源ケーブルの長さ、接続の状態、また引き回しはエミッションに著しく影響するかも知れない。

エミッションが最大となるような条件を選択すべきであるが、一般には軽負荷での試験が許容される。<sup>†39</sup>

#### 5.4.2 電源ポート伝導エミッション

- 所定のエミッション限度 (図 18) に適合すること。<sup>†40</sup>

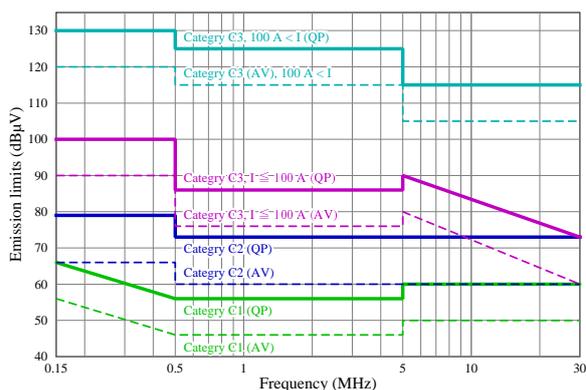


図 18: 電源ポート伝導エミッション限度

- 測定は以下のいずれかのセットアップで行なう:
  - オープン・サイトか半無響室で、CMAD を使用しないことを除いて放射エミッション測定 (図 24、図 25 参照) と同様のセットアップで、
  - グランド・プレーンの上で、あるいは
  - 卓上機器の場合、基準接地面 (グランド・プレーンか金属の壁) から 0.4 m の距離に置いて。
- 製造業者が電源コードを提供している場合、それが 1 m よりも長ければ余長を 0.4 m 以下の長さで折り返して束ねる。  
その他の場合、指定されたタイプの長さ 1 m のケーブルを使用する。

<sup>†39</sup> PDS の出力の電圧や電流、スイッチング周波数などは設定や動作条件などによって変化し、それに伴ってエミッションの特性が有意に変化するかも知れない。どの条件が不利となりそうかわからない場合、様々な条件での予備試験を行なうことを考えても良いかも知れない。

<sup>†40</sup> カテゴリ C1、C2、C3 ( $\leq 100$  A)、及び C3 ( $> 100$  A) の限度は、それぞれ CISPR 11:2015 Group 1 Class B、Class A ( $\leq 20$  kVA)、Class A (20 ~ 75 kVA)、Class A ( $> 75$  kVA) の限度と同等である。また、カテゴリ C1 の限度は IEC 61000-6-3 など、カテゴリ C2 の限度は IEC 61000-6-4 などとも同等である。カテゴリ C3 の限度は IEC 61000-6-4 や CISPR 11 ( $\leq 20$  kVA) などの限度よりも高く、従ってそのような限度への適合が必要となる機器やシステムでの使用が想定される場合はカテゴリ C3 への適合では不十分かも知れない。

- 測定は AMN (artificial mains network; 擬似電源回路網) を用いて行なうのが基本だが、電流が大き過ぎて AMN を使用できない場合などは代わりにハイ・インピーダンス・プローブで測定できる。<sup>†41†42</sup>

#### 5.4.3 パワー・インターフェース伝導エミッション

- カテゴリ C1、C2

以下のいずれかの手段を用いる:

- ケーブルを 2 m 未満とする、あるいはシールド・ケーブルを用いる。  
後者の場合、シールドは高周波品質で、全長にわたり連続し、少なくとも CDM とモータに 360° 接続<sup>†43</sup>されること。

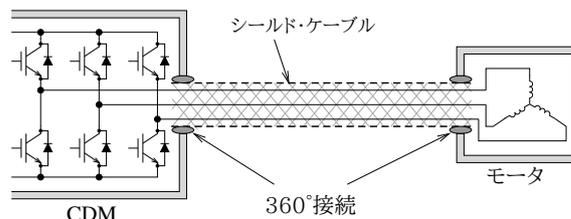


図 19: シールドの両端での接続

- 定格出力電流におけるエミッションをハイ・インピーダンス・プローブ<sup>†44</sup>を用いて測定し、所定の限度 (図 21) への適合を確認する。

<sup>†41</sup> ハイ・インピーダンス・プローブは CISPR 16-1-2 で述べられており、典型的には 10 nF 程度のコンデンサ (低周波成分を阻止する) と 1.5 k $\Omega$  程度の抵抗 (測定器の 50  $\Omega$  の入力とで分圧回路を構成する) を直列としたものとなる。

<sup>†42</sup> AMN を用いた測定では電源のインピーダンスは AMN で管理されるが、ハイ・インピーダンス・プローブでの測定では電源のインピーダンスが管理されず、これが試験結果に顕著な影響を与える可能性が予期される。例えば電源が近傍に設置されたフィルタを介して給電されている場合 (シールド・ルームや電波暗室に引き込まれた電源はそのようになっていることが多い)、測定対象のラインが測定箇所の近傍でコンデンサを介して接地された状態となり、エミッションが著しく低く測定されるかも知れない。

<sup>†43</sup> 360° 接続は例えば CDM やモータのシールド・ケースに取り付けた EMC 用のケーブル・グランド (cable gland) を用いてケーブルのシールドを全周でシールド・ケースに接続することで行なえる (図 20)。いわゆるビッグテール接続やケーブルの片側のみでのシールド接続はこの条件を満たさず、また両端での 360° 接続を行なった場合のような高いシールド効果は期待できない。用途によっては導電性のコンジット (チューブ) をシールドとして使用できることもあるが、この場合も単なる機械的な保護用のコンジットではなく 360° 接続を行なえる EMC 用のコンジットの適切な使用が必要となる。

<sup>†44</sup> 勿論、この測定で使用するハイ・インピーダンス・プローブは測定箇所の電圧の測定に適したものでなければならない。次項とその脚注も参照。

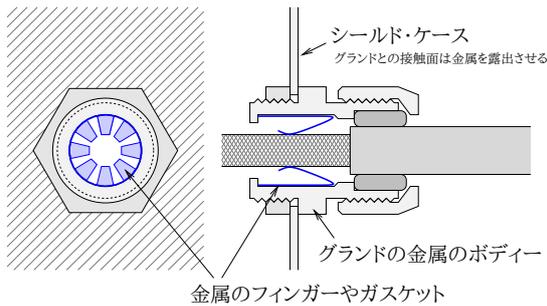


図 20: EMC 用ケーブル・グラントの原理の例 — 金属のフィンガーなどを介してケーブル・シールドとシールド・ケースを 360° 接続する

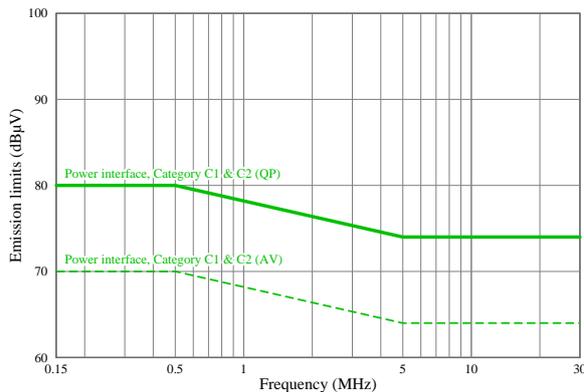


図 21: パワー・インターフェース伝導エミッション限度

- 適用された緩和手段から前項の方法での確認が適当でない<sup>†45</sup>場合、電源ポート伝導エミッション測定に際して電源ケーブルとパワー・インターフェース・ケーブルを結合させ、緩和手段の効果を確認する。この結合は、電源ケーブルとパワー・インターフェース・ケーブルを少なくとも 0.6 m にわたって 10 cm 以下の間隔で引くことで、EUT と AMN のあいだの 1 m の距離にわたって発生させる。

- カテゴリ C3 — 設置指示書にパワー・インターフェースの設置に関する必要な全ての情報を含める。

<sup>†45</sup> 例えば PWM (パルス幅変調) インバータの各出力ラインには PWM された電圧波形がそのまま現れることが多く (図 4)、ハイ・インピーダンス・プローブで測定すると著しく高いエミッションが観測されるだけでなくハイ・インピーダンス・プローブやその先の測定器を損傷させる危険も考えられる。これはケーブルからの放射の主因となる高い周波数のコモン・モード成分が適度に抑制されている場合でも同様である。

#### 5.4.4 プロセス測定/制御ポート伝導エミッション

- テレコミュニケーション・ポート — 公共通信回線への接続が意図されたポートは、カテゴリ C1 と C2 は CISPR 32 Class B、カテゴリ C3 は CISPR 22 Class A の限度に適合すること (図 22)。

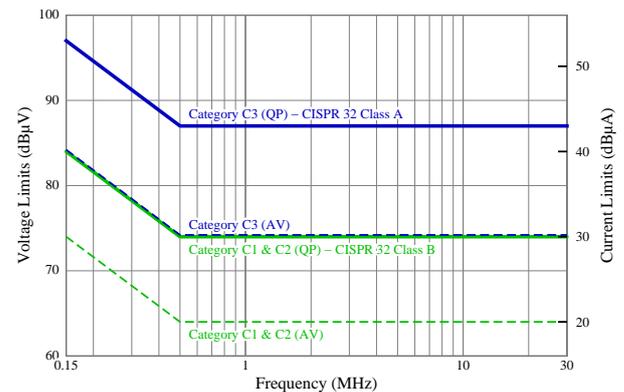


図 22: テレコミュニケーション・ポート伝導エミッション限度

- フィールドバス — 当該のフィールドバスに該当する規格の要求に従う。<sup>†46</sup>

例えば IEC 61000-6-4:2018 や CISPR 14-1:2016 のように、公共通信回線への接続の有無とは無関係に、広範囲に分散したシステムの相互接続が意図されたポートが上記のテレコミュニケーション・ポートと同様の測定の対象となる規格も少なくない。従って、そのような規格への適合が目標となる機器やシステムでの使用が想定される場合、そのようなポート上のノイズがシステムのエミッションに顕著に影響する可能性が予期される場合などは、広範囲に分散したシステムの相互接続のための使用が想定されるポート全て (LAN やフィールドバスを含む) について上記のテレコミュニケーション・ポートと同様の確認を行っておくのが良いかも知れない。

#### 5.4.5 放射エミッション

- 所定のエミッション限度 (図 23) に適合すること。<sup>†47</sup>

<sup>†46</sup> フィールドバスの規格で具体的な EMC 要求を含むものは少ないと思われる。

<sup>†47</sup> カテゴリ C1、C2、及び C3 の限度は、それぞれ CISPR 11:2015 Group 1 Class B、Class A ( $\leq 20$  kVA)、Class A ( $> 20$  kVA) の限度と同様である。また、カテゴリ C1 の

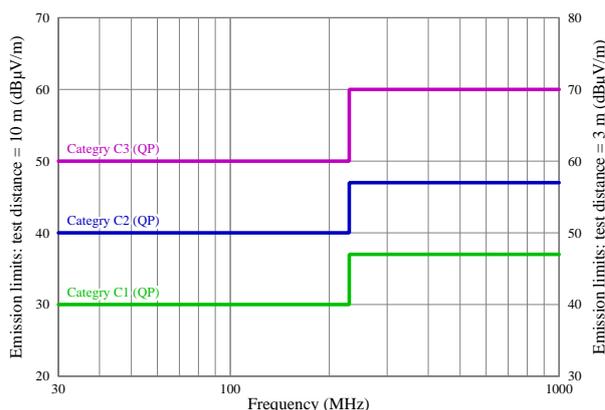


図 23: 放射エミッション限度

- 測定は CISPR 16-1-4 に適合したサイト（オープン・サイトか半無響室）で行なう。

カテゴリ C3 の PDS は、試験サイトの要求に従うことが実際的でないならば完全に適合していない場所で測定しても良いが、その場所の使用を正当化しなければならない。

- 小型の PDS（機器やケーブルが直径 1.2 m、グラウンド・プレーンからの高さ 1.5 m の仮想的な円筒に収まるもの）は測定距離 10 m か 3 m で、その他のものは測定距離 10 m で測定する。
- モータはテスト・ボリウム（EUT の構成全体を含む仮想的な円筒）の中に置いてもテスト・ボリウムの周囲やグラウンド・プレーンの下に置いても良いが、最大ケーブル長がそれよりも短い場合を除き、モータへのパワー・インターフェース・ケーブルはテスト・ボリウム内で少なくとも 0.8 m 露出させる。
- モータをターン・テーブルの外側に置いたためにターン・テーブルを回せない場合、*in situ* 測定と同様に周囲での測定を行なう。
- EUT の一部でない補助機器はテスト・ボリウム外に置くべきだが、ケーブル長の制限でそのようにできない場合はテスト・ボリウム内に置いて良い。
- ケーブルの余長はケーブルの中央で 0.3~0.4 m で束ねる。

限度は IEC 61000-6-3 など、カテゴリ C2 の限度は IEC 61000-6-4 などとも同等である。カテゴリ C3 の限度は IEC 61000-6-4 や CISPR 11 ( $\leq 20$  kVA) などの限度よりも高く、従ってそのような限度への適合が必要となる機器やシステムでの使用が想定される場合はカテゴリ C3 への適合では不十分かも知れない。

- 接地線が必要な場合、少なくとも 1 m とし、ユーザー向け文書で述べられているように接続する。<sup>†48</sup>
- テスト・ボリウムから出るケーブルは CMAD<sup>†49</sup>に通すことが推奨されるが、これは必須ではない。
- 電源は AMN に通すことが推奨されるが、これは必須ではない。
- モータの電力定格は CDM の電力定格よりも低くても良いが、CDM のインバータ部が正しく動作できるものでなければならない。
- 測定セットアップのイメージを、図 24、及び図 25 に示す。

## 6 ユーザーへの情報

この規格は装置やシステム全体ではなくそれらの要素となる PDS やそのコンポーネントに適用され、実際の使用に際しての EMC の達成のためには PDS の設置やケーブルの接続などを製造業者が意図したように正しく行なうことが必要となる。このため、製造業者は、PDS とともに提供されるユーザー向け文書でこの規格への適合性を示すとともに、意図された環境の典型的なシステムやプロセスにその PDS を正しく組み込むために必要な全ての情報を提供しなければならない。<sup>†50</sup>

特別な EMC 対策手段が必要であれば明確に文書化しなければならず、これは以下の情報を含むかも知れない:

- 最大/最小許容電源網インピーダンス;
- シールド付きの、あるいは特殊なケーブルの使用;
- ケーブル・シールドの接続の要求;
- 最大許容ケーブル長;

<sup>†48</sup> CISPR 11<sup>[8]</sup> では接地線は主電源線から 0.1 m よりも離れないように引くと規定されているので、ユーザー向け文書でそれと異なることが述べられていない限り、その規定に従った方が良いでしょう。

<sup>†49</sup> CMAD (common mode absorption device) — CISPR 16-1-4 で規定された条件を満たすフェライト・クランプ。

<sup>†50</sup> 製造業者によっては設置に関する詳細なガイド (例えば [15] のような) を機種毎の設置指示書と別に提供していることもある。

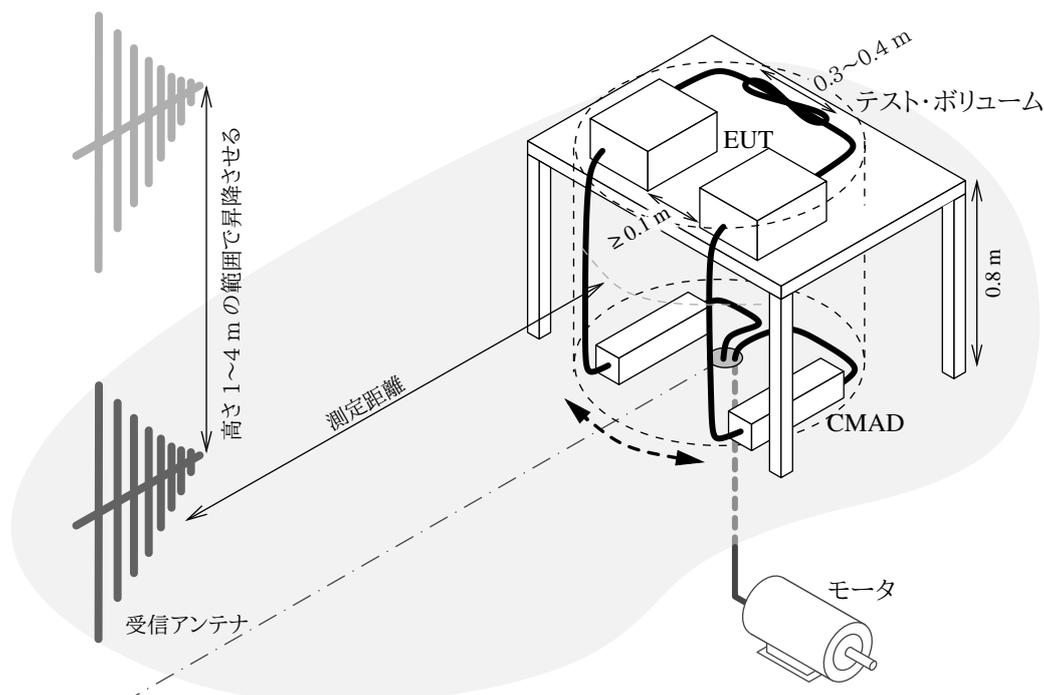


図 24: 放射エミッション測定の設定アップの例 (卓上機器)

- ケーブルの隔離;
- フィルタなどの外部デバイスの使用;
- 機能接地への正しい接続。

環境によって異なる接続が必要な場合、それも明記する。<sup>†51</sup>PDS に追加することができる、イミュニティやエミッションの要求に適合する追加のデバイスがある場合、そのリストも必要となる。

PDS が電磁妨害を受けた時の性能の低下やその他の想定される挙動に関する情報も必要となるであろう。<sup>†52</sup>

また、該当する場合、設置/使用指示書には以下の情報も必要となる:

- イミュニティが第 1 種環境に対するものである場合、工業環境での使用が意図されていない旨の明確な警告
- パワー・インターフェース・ケーブルの信号ケーブルからの隔離に関する勧告、あるいは代替の緩和手段

<sup>†51</sup> 例えば、カテゴリ C2 の PDS で、第 1 種環境で使用する場合にのみシールド・ケーブルやフィルタの使用が必須となるような場合。

<sup>†52</sup> ディップ/短時間停電に際しての性能の低下の情報の提供は明確に要求されている。

- カテゴリ C1 のエミッション要求に適合しない場合、下記の警告:

#### Warning

In a residential environment, this product may cause radio interference in which case supplementary mitigation measures may be required.

- カテゴリ C1 が C2 のエミッション要求に適合しない場合、
  - その PDS は住居に給電する低圧公共配電網への接続は意図されていない旨
  - そのような配電網上で使用した場合は無線周波干渉が予期される旨

を示す警告、また推奨される緩和デバイスを含む、設置と使用のガイド

- 第 2 種環境で使用される PDS については、パワー・インターフェースの設置に関する必要な全ての情報
- 転流ノッチの考慮が必要な場合、PDS に含まれる減結合リアクタンス、及び緩和のために外部に追加できる減結合リアクタンスの情報

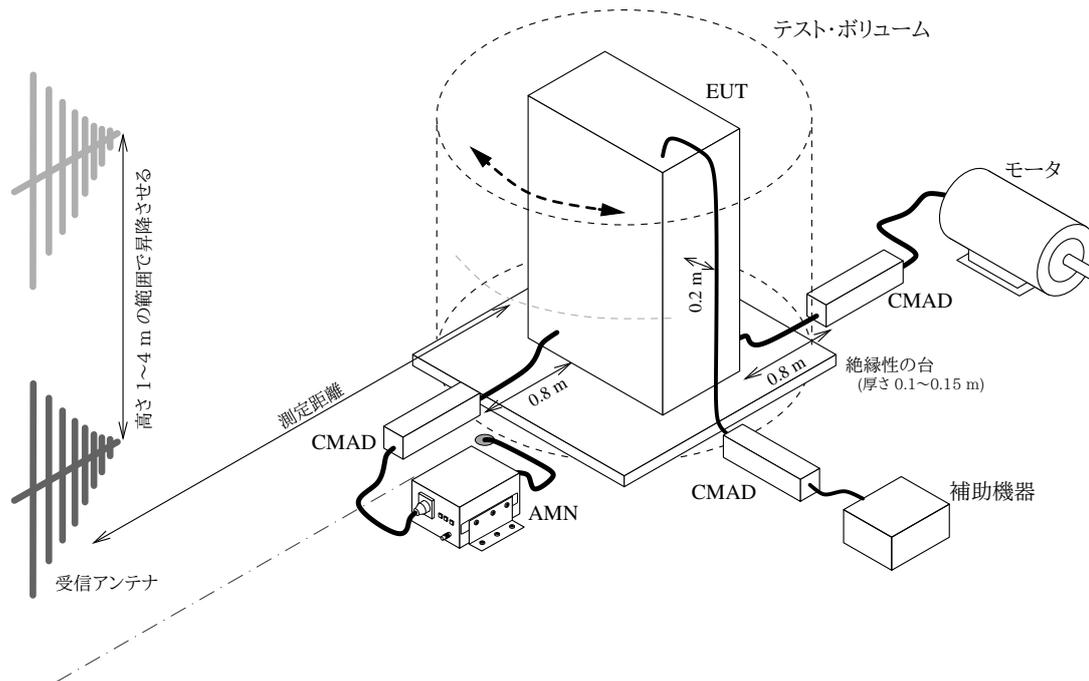


図 25: 放射エミッション測定のセットアップの例 (床置き機器)

- IEC 61000-3-2 や IEC 61000-3-12 の適用範囲から外れる場合、定格負荷条件での RMS 電流に対する THC、及び 40 次までの高調波電流

IEC 61800-5-2 では PDS(SR) の設計/開発、インテグレーション、またバリデーションに関する要求や勧告が示されており、その一部としてイミュニティの要求も含んでいる。

## 7 安全関連機能を持つもの

PDS は安全に関連する用途で使用されることがあり、安全関連機能を持つ PDS (PDS(SR) と呼ばれる) に対する規格としては IEC 61800-5-2<sup>[2]</sup> がある。

PDS(SR) は、例えば、

- モータの意図しない動作、過剰な速度やトルク、可動部の規定された範囲外への移動などが安全を損ない得る場合<sup>†53</sup>
- 非常停止やインターロックを PDS の機能を用いて実現したい場合<sup>†54</sup>

などに必要となるかも知れず、このような PDS(SR) は IEC 61131-6<sup>[14]</sup> に適合したプログラマブル・コントローラなどと組み合わせて使用されるかも知れない。

<sup>†53</sup> このような制限は、人が近くに居るなどの特定の状況で必要となるかも知れない。

<sup>†54</sup> この古典的な実現方法は機械を停止させるべき時 (例えば非常停止ボタンが押された時) は動力源を遮断することであるが、この場合は PDS での機能安全の考慮は必要とならない。

### 7.1 PDS(SR) の安全関連機能

IEC 61800-5-2 で規定された PDS 固有の安全関連機能としては以下のようなものがある。

#### 7.1.1 停止機能

- Safe torque off (STO) — モータへの駆動のための電力を止める
- Safe stop 1 (SS1) — モータを選択された条件に従って減速させ、STO 機能を実行する
- Safe stop 2 (SS2) — モータを選択された条件に従って減速させ、SOS 機能を実行する

#### 7.1.2 監視機能

- Safe operating stop (SOS) — モータが停止位置から規定された範囲を超えて動かないようにする

- Safely-limited acceleration (SLA) — モータが規定された加速率/減速率を超えないようにする
- Safe acceleration range (SAR) — モータの加速率/減速率を規定された範囲内に保つ
- Safely-limited speed (SLS) — モータが規定された速度限界を超えないようにする
- Safe speed range (SSR) — モータ速度を規定された速度限界内に保つ
- Safely-limited torque (SLT) — モータが規定されたトルクを超えないようにする
- Safe torque range (STR) — モータのトルクを規定された範囲内に保つ
- Safely-limited position (SLP) — モータの軸が規定された位置を超えて動かないようにする
- Safely-limited increment (SLI) — モータの軸が規定された増分を超えて動かないようにする
- Safe direction (SDI) — モータの軸が意図しない方向に規定された量以上動かないようにする
- Safe motor temperature (SMT) — モータの温度が規定された上限温度を超えないようにする
- Safe cam (SCA) — モータの軸の位置が規定された範囲にあるかどうかを示す安全出力
- Safe speed monitor (SSM) — モータの速度が規定された限界を超えていないかどうかを示す安全出力
- Safe brake control (SBC) — ブレーキを制御する安全出力

## 7.2 性能判定基準 FS

PDS(SR) の安全関連機能には性能判定基準 FS<sup>†55</sup>が適用され、PDS(SR) の安全サブ機能は以下の条件を満たすことが必要となる:

- 機能安全のための規定された限界を超える逸脱がない、あるいは;

<sup>†55</sup> ここで FS と言っているものは IEC 61326-3-1<sup>[7][9]</sup> など “DS” と言っているものと同様のものである。

- PDS(SR) が規定された安全状態 (フェールセーフ状態) を維持するか規定された最大故障応答時間内に達成されるような形で電磁妨害に反応する限り、機能安全のための規定された限界を超える逸脱があっても良い。

安全サブ機能の恒久的な劣化は、規定された安全状態が維持されるか規定された最大故障応答時間内に達成される限り、許容される。

特定の PDS(SR) に適用される具体的な性能判定基準 FS (また、規定された安全状態) は、§7.1 で述べた安全関連機能を参照する形で規定されるかも知れない。

例えば、ある PDS(SR) では STO 状態が規定された安全状態で、通常は SLS と SLT の範囲内で動作するが、停止信号が入力された場合や異常が検出された場合は規定された時間内に STO を実行してその状態を維持するかも知れない。<sup>†56†57</sup>

## 7.3 PDS(SR) のイミュニティ試験レベル

参考までに、表 10 に IEC 61800-5-2:2016 の第 2 種環境のイミュニティ試験レベルを示しておく。

なお、IEC 61800-5-2 のイミュニティ試験に関する要求は安全関連機能のイミュニティの評価を意図しているものではあるが、単にやや厳しいイミュニティ試験レベルでの試験を要求しているだけであり、IEC 61326-3-1<sup>[7][9]</sup> などと同様、その試験に合格させるだけで機能安全のための EMC を達成できるわけではない。機能安全の達成のためには、この規格で述べられた他の事項に、また IEC 61508 や関係するその他の要求に従うことが不可欠となるであろう。

<sup>†56</sup> このような PDS(SR) を SLS と SLT の範囲内で動作するような設定で動作させてイミュニティ試験を行なった場合、通常は SLS や SLT が機能していなかったとしてもその範囲内で動作する等で、従ってその試験では SLS や SLT の機能は確認されていないことになる。ある程度までは安全関連機能を確認できるように工夫できるかも知れないものの、試験での確認はかなり限定的なものとなることが予期される。

<sup>†57</sup> 例えば規定状態が STO や SOS を含む PDS(SR) の試験に際しては、モータの軸の動きからだけでは STO と SOS の (さらには安全機能が作動しておらず単に回転速度がゼロとなっているだけの状態の) 区別もできないため、確認が必要な機能に応じてその確認のための適切な手段を用意することも必要となるかも知れない。その他の安全機能についてもその確認のためには工夫が必要となりそうである。

試験	試験レベル			
	IEC 61800-5-2:2016 第2種環境		IEC 61800-3:2017 第2種環境	
エンクロージャ・ポート				
IEC 61000-4-2	接触: $\pm 6$ kV (キャビネットは $\pm 8$ kV) 気中: $\pm 8$ kV (キャビネットは $\pm 15$ kV)	FS FS	接触: $\pm 4$ kV 気中: $\pm 8$ kV	B B
IEC 61000-4-3	80 MHz ~ 1 GHz: $20$ V/m 1.4 ~ 2 GHz: $10$ V/m 2 ~ 6 GHz: $3$ V/m	FS FS FS	80 MHz ~ 1 GHz: $10$ V/m 1.4 ~ 2 GHz: $3$ V/m 2 ~ 2.7 GHz: $1$ V/m	A A A
IEC 61000-4-8	—	—	—	—
電源ポート — 低周波イミュニティ				
高調波 (THD)	—	—	THD 12 %	A
個別高調波	—	—	IEC 61000-4-13 Class 3 (表5)	A
転流ノッチ	—	—	深さ 40 %、面積 250 % degrees	A
電圧偏差 (> 60 s)	+10 % / -15 %	FS	$\pm 10$ %	A
ディップ/短時間停電 (IEC 61000-4-11, -4-34)	0 % 1 サイクル	FS	0 % 1 サイクル	C
	40 % 10/12 サイクル (50/60 Hz)	FS	40 % 10/12 サイクル (50/60 Hz)	C
	70 % 25/30 サイクル (50/60 Hz)	FS	70 % 25/30 サイクル (50/60 Hz)	C
	80 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	FS	80 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C
	0 % 10/12 サイクル (50/60 Hz)	FS	—	—
0 % 25/30 サイクル (50/60 Hz)	FS	—	—	
0 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	FS	0 % 250/300 サイクル (50/60 Hz)	C	
ディップ — 直流電源 (IEC 61000-4-29)	40 % 0.5 s	FS	—	—
	70 % 0.5 s	FS	—	—
電圧不平衡	—	—	逆相分 3 %	A
周波数変動	—	—	$\pm 2$ % 公共配電網から分離された電源では $\pm 4$ %	A
周波数変化率	—	—	1 %/s 公共配電網から分離された電源では $\pm 2$ %/s	A
電源ポート				
IEC 61000-4-4	$\pm 4$ kV (5 kHz)	FS	$\pm 2$ kV (5 kHz)	B
IEC 61000-4-5	ライン-ライン: $\pm 2$ kV	FS	ライン-ライン: $\pm 1$ kV	B
	ライン-接地: $\pm 4$ kV	FS	ライン-接地: $\pm 2$ kV	B
IEC 61000-4-6	0.15 ~ 80 MHz: $20$ V	FS	0.15 ~ 80 MHz: $10$ V	A
パワー・インターフェース				
IEC 61000-4-4	$\pm 4$ kV (5 kHz)	FS	$\pm 2$ kV (5 kHz)	B
信号インターフェース				
IEC 61000-4-4	$\pm 2$ kV (5 kHz)	FS	$\pm 1$ kV (5 kHz)	B
IEC 61000-4-6	0.15 ~ 80 MHz: $20$ V	FS	0.15 ~ 80 MHz: $10$ V	
プロセス測定/制御線				
IEC 61000-4-4	$\pm 4$ kV (5 kHz)	FS	$\pm 2$ kV (5 kHz)	B
IEC 61000-4-5	ライン-接地: $\pm 2$ kV	FS	ライン-接地: $\pm 1$ kV	B
IEC 61000-4-6	0.15 ~ 80 MHz: $20$ V	FS	0.15 ~ 80 MHz: $10$ V	A

表 10: IEC 61800-5-2:2016 イミュニティ試験レベル (第2種環境, 低圧 PDS)

## 8 参考資料

- [1] IEC 61800-3:2017, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods*
- [2] IEC 61800-5-2:2016, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-2: Safety requirements – Functional*
- [3] IEC 61000-2-4, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*
- [4] IEC 61000-4-13:2002, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-13: Testing and measurement techniques – Harmonics and interharmonics including mains signalling at a.c. power port, low frequency immunity tests*
- [5] IEC 61000-4-27, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-27: Testing and measurement techniques – Unbalance, immunity test*
- [6] IEC 61000-4-28, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-28: Testing and measurement techniques – Variation of power frequency, immunity test for equipment with input current not exceeding 16 A per phase*
- [7] IEC 61326-3-1:2017, *Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements – Part 3-1: Immunity requirements for safety-related systems and for equipment intended to perform safety-related functions (functional safety) – General industrial applications*
- [8] CISPR 11:2015+A1:2016, *Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*
- [9] 安全関連機能を持つ機器のイミュニティ — IEC 61326-3-1、-3-2 の概要, 株式会社 e・オートマ, 佐藤, 2019,  
<http://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [10] IEC 61000-4 シリーズ イミュニティ試験規格の概要, 株式会社 e・オートマ, 佐藤, 2018,  
<http://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [11] 電源高調波電流の制限 — IEC 61000-3-2, -3-12 の概要, 株式会社 e・オートマ, 佐藤, 2020,  
<http://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [12] 電圧変動やフリッカの制限 — IEC 61000-3-3, -3-11 の概要, 株式会社 e・オートマ, 佐藤, 2020,  
<http://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [13] CISPR 32 の概要, 株式会社 e・オートマ, 佐藤, 2017,  
<http://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [14] プログラマブル・コントローラの EMC — IEC 61131-2 の概要,  
<http://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [15] *Electrical installation guide*, Schneider Electric, 2018,  
<https://www.se.com/ww/en/download/document/EIGED306001EN/>