

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 佐藤智典

2022 年 6 月 17 日

目次

1	はじめに	1
2	適用範囲	1
3	試験レベル	2
3.1	クラス 1	2
3.2	クラス 2	2
3.3	クラス 3	2
4	試験	2
4.1	組み合わせ高調波	3
4.1.1	フラット・カーブ	3
4.1.2	オーバースィング	4
4.2	周波数掃引	4
4.3	個別高調波と中間高調波	5
4.3.1	個別高調波	5
4.3.2	中間高調波	5
4.4	マイスター・カーブ	6
5	試験システム	7
6	補足	7
6.1	高調波や中間高調波を重畳した波形の例	7
6.2	高調波の位相角の影響	7
6.3	電源電圧の高調波歪みの発生	9
6.4	UPS などの電圧波形	10
7	参考資料	10

1 はじめに

50 Hz や 60 Hz の交流電源の波形は理想的にはその周波数の純粋な正弦波で、通常はそのような正弦波とみなして扱うことができるが、実際の電圧波形は電源系統に接続された他の負荷などの影響によってその程度は様々であるものの無視できない歪みを持つ。このような電源電圧波形の歪みはその電源から給電される電気機器に悪影響を与える可能性があるが、電気機器は実際の使用で予期される電源電圧波形の歪みに耐えて正常に機能することが期待されるであろう。

IEC 61000-4-13 ではそのような電源電圧波形の歪みに対するイミュニティの評価のための試験法などが示されている。

本稿では、この IEC 61000-4-13^[1] 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^[1]を参照していただきたい。

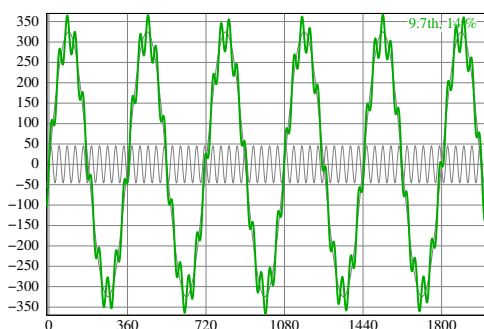
2 適用範囲

この規格は 50 Hz や 60 Hz の電源から給電される 16 A/相以下の機器に適用可能であり、電源電圧の、電源周波数の 40 倍 (50 Hz の場合は 2 kHz、60 Hz の場合は 2.4 kHz) までの範囲の高調波^{†1}や中間高調波^{†2}の影響をカバーする。

但し、この規格では電源電圧波形の歪みに伴う機能上の問題のような短期的な影響のみが扱われる。電源電圧波形の歪みが影響が現れるまでに時間を要

^{†1} 高調波 (harmonics) は基本周波数の 1 よりも大きい整数倍 (基本周波数が 50 Hz の場合、100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, ...) の周波数成分を意味する。

^{†2} 中間高調波もしくは次数間高調波 (interharmonics) は基本周波数の整数倍以外の周波数成分を意味する。



するような事象、例えば電圧波形の歪みがトランス、インダクタ、モータなどの巻線部品の過熱を引きこすような可能性も考えられるが、この規格ではそのような現象は考慮されていない。

3 試験レベル

この規格を参照する規格は対象となる機器に適用すべき試験レベルをこの規格で示されたクラス 1～3 のいずれかの試験レベルのいずれかとして、あるいはその他の任意の試験レベル (クラス X) として規定しているかも知れない。

そのような規定がない場合、機器に適用する試験レベルはそれぞれのクラスがどのような環境を想定したものであるかを考慮し、機器の使用が想定される最も厳しい環境に応じて決定できるであろう。

この規格で示されているクラス 1～3 の試験レベルは主に住商業環境や軽工業環境を想定したもので、特に重工業環境向けの機器では予期される電源電圧波形の歪みに応じたより厳しい試験レベルの適用が必要となる可能性もある。

また、クラス 1 は特別な保護が行なわれた電源環境を想定したもので、公共配電網への接続が想定される機器にはクラス 2 かそれよりも厳しいクラスを適用すべきである。

3.1 クラス 1

このクラスは保護された電源に適用され、公共配電網レベルよりも低い両立性レベルを持つ。

これは、例えば実験室用の計測器、ある種の自動化/保護用の機器、ある種のコンピュータなどの、電源上の妨害に非常に敏感な機器の使用に関係する。

補足 1 クラス 1 環境は通常は無停電電源装置 (UPS) やフィルタ^{†3}などの装置による保護を含む。

補足 2 高い歪みの UPS が用いられる場合はクラス 2 が推奨されるかも知れない。^{†4}

^{†3} 通常のノイズ・フィルタでは高調波歪みに対する改善の効果は期待できず、また著しい高調波歪みではフィルタ自身が損傷やその他の問題を引き起こす可能性もある。高調波歪みの改善のためにはその目的で設計されたフィルタやトランスなどが必要となるだろう。

^{†4} UPS によってはこの規格のクラス 3 の試験レベルよりも高い歪みを持つ電圧波形を発生するかも知れず、そのような UPS からの給電も想定される場合はそのような著しい歪みに耐えることも必要となりそうである。§6.4も参照。

3.2 クラス 2

このクラスは一般的な工業環境の共通結合点 (消費者のシステムの PCC^{†5}) とプラント内共通結合点 (IPC^{†6}) に適用される。このクラスの両立性レベルは公共電源網のものと同一であり、従って公共電源網用に設計されたコンポーネントは工業環境のこのクラスで使用できる。

3.3 クラス 3

このクラスは工業環境の IPC にのみ適用される。これはある種の妨害現象に関してクラス 2 よりも高い両立性レベルを持つ。例えば以下のいずれかの条件に該当する場合はこのクラスを考慮すべきである:

- 負荷の相当の部分がコンバータを介して給電される
- 溶接機が存在する
- 大型モータの始動が頻繁に行なわれる
- 負荷が急激に変動する

補足 1 通常は防護されたバスバーから給電されるアーク炉や大型のコンバータのような著しい妨害を与える負荷への電源は、しばしばクラス 3 (最も厳しい環境) を超える妨害レベルを持つ。そのような特別な状況での両立性レベルは両者の協議に依る。

補足 2 新規のプラントや既存のプラントの拡張で適用するクラスは関係する機器やプロセスの種類に関係する。

4 試験

この規格では、

- 組み合わせ高調波 (§4.1)
- 周波数掃引 (§4.2)
- 個別高調波と中間高調波 (§4.3)
- マイスター・カーブ (§4.4) — クラス 2 のみ

の試験法とクラス 1～3 の各クラスに対する試験レベルが示されている。

必ずしもこれらの試験全てを行なう必要はなく、通常、試験は 図 1 や 図 2 で示したようなフローに沿って行なうことができる。^{†7}

^{†5} PCC — points of common coupling

^{†6} IPC — in-plant points of common coupling

^{†7} これらのフローは IEC 61000-4-13 Figure 1a, 1b に基づ

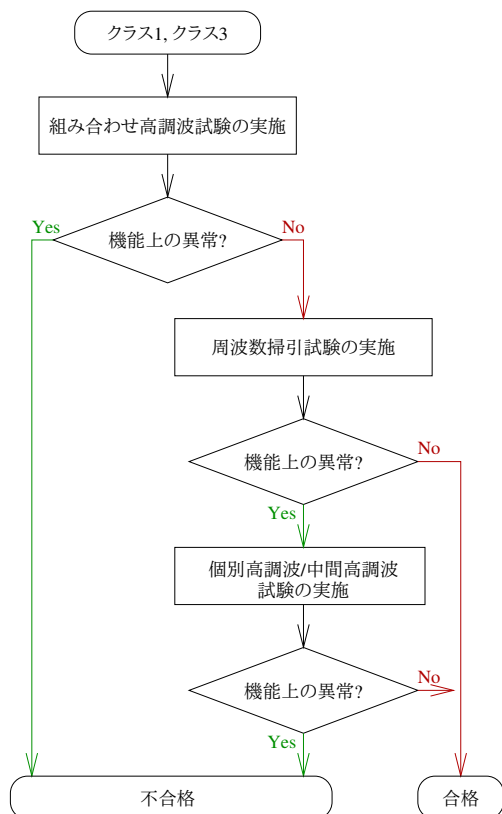


図 1: 試験のフロー — クラス 1, クラス 3

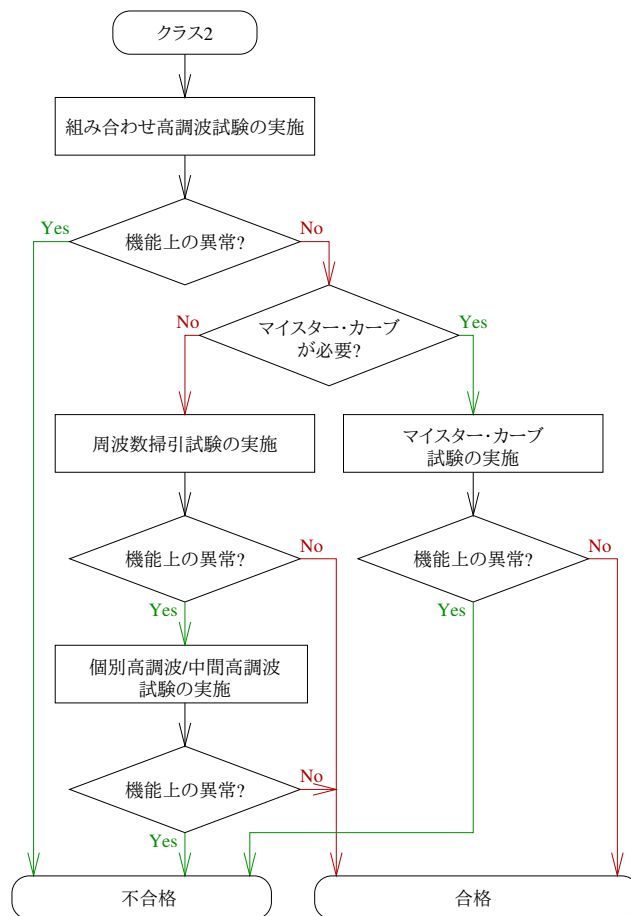


図 2: 試験のフロー — クラス 2

高調波の大きさは基本周波数 f_1 (50 Hz や 60 Hz の電源周波数) の成分である基本波電圧 U_1 に対する比率として規定されている。

いずれの試験でも、高調波が重畳された電源電圧波形の振幅はその実効値が規定された電源電圧 (例えば 230 V) となるように設定する。

また、多相の電源の場合、高調波の重畳は全てのライン—中性線に同時に行なう。

4.1 組み合わせ高調波

組み合わせ高調波には以下の 2 つが含まれる:

- フラット・カーブ (§4.1.1) — 正弦波の頭を規定されたレベルでクリップした波形
- オバーシング (§4.1.2) — 規定されたレベルの 3 次と 5 次の高調波を重畳させた、尖った波形

フラット・カーブは電源電圧波形のピークが潰れた状況 (図 21 に示すように、しばしば電源電圧波形のピーク付近でのみ電流が高くなる整流平滑回路の影響で発生する) を、オーバーシングはその逆にピーク電圧が高くなった状況 (3 相電源でしばしば見られる) を代表する。

図 1 と図 2 に示したフローでは、これらの試験を最初に行なうように、またそのいずれかの試験で不合格となった場合はその段階で不合格と判断するようになっている。

4.1.1 フラット・カーブ

図 3 に図示するように電源周波数の正弦波を表 1 で示したような高さでクリップし、実効値が所定の値 (例えば 230 V) となるようにした図 4 のような電圧波形を 2 分間印加する。

いており、これらは「試験時間をどのように最適化するかガイド」を示されたものであると述べられているものの、特別な事情がない限りこれらのフローに沿うことが望ましいと思われる。

クラス	平坦部のレベル
1	0.95
2	0.9
3	0.8

表 1: フラット・カーブ試験波形のパラメータ

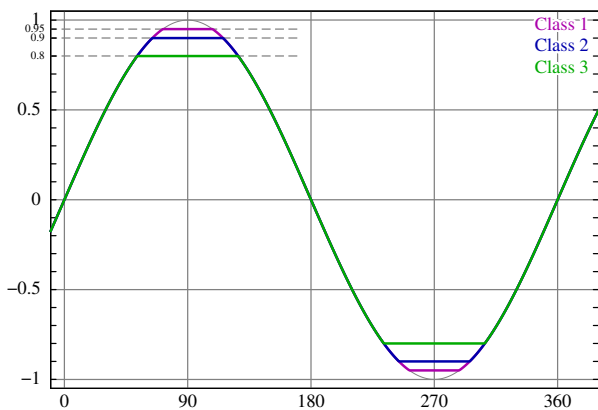


図 3: フラット・カーブ

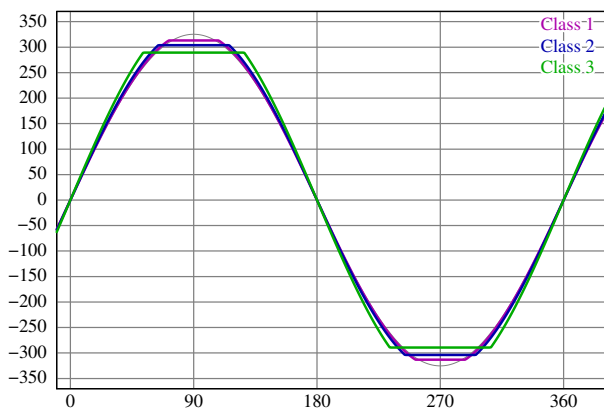


図 4: フラット・カーブ — $U_{rms} = 230\text{ V}$

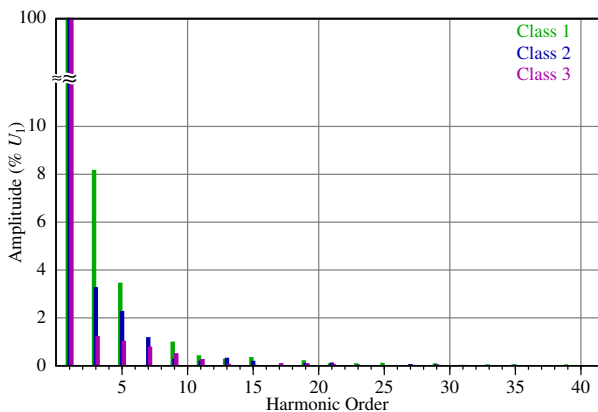


図 5: フラット・カーブのスペクトラム

4.1.2 オーバースィング

図 6 に図示するように電源周波数の正弦波に表 2 で示したような振幅と位相角の 3 次と 5 次の高調波を重ねし、実効値が所定の値 (例えば 230 V) となるようにした図 7 のような尖った電圧波形を 2 分間印加する。

クラス	3 次高調波	5 次高調波
1	4 % $U_1 / 180^\circ$	3 % $U_1 / 0^\circ$
2	6 % $U_1 / 180^\circ$	4 % $U_1 / 0^\circ$
3	8 % $U_1 / 180^\circ$	5 % $U_1 / 0^\circ$

表 2: IEC 61000-4-13 オーバースィング試験波形のパラメータ

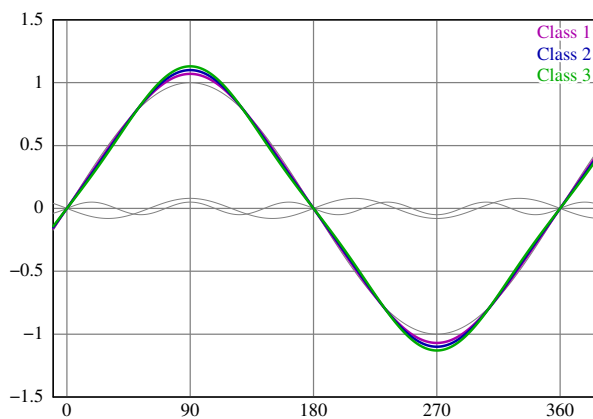


図 6: オーバースィング

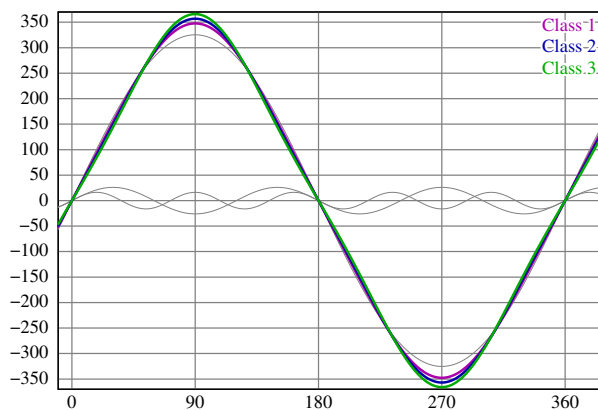


図 7: オーバースィング — $U_{rms} = 230\text{ V}$

4.2 周波数掃引

表 3 で、また図 8 の「周波数掃引」のラインで示したようなレベルの高調波や中間高調波を、周波数

掃引を連続的に、あるいは表 4 に示したような周波数ステップで周波数掃引しながら重畳する。

周波数掃引は 5 分/ディケード以下の割合で行ない、さらに何らかの異常が見られた場合はその周波数で 120 秒以上留める。

周波数掃引試験の試験レベルは同じクラスの個別高調波/中間高調波の試験レベルよりも高く設定されている (図 8)。

図 1 と図 2 に示したフローでは、周波数掃引試験で不合格となった場合はさらに個別高調波/中間高調波の試験を実施して合否を判断できるが、周波数掃引試験に合格した場合は個別高調波/中間高調波の試験なしで合格と判断できるようになっている。

周波数範囲 f	試験レベル (% U_1)		
	クラス 1	クラス 2	クラス 3
$0.33 \times f_1 \sim 2 \times f_1$	2	3	4.5
$2 \times f_1 \sim 10 \times f_1$	5	9	14
$10 \times f_1 \sim 20 \times f_1$	4	4.5	9
$20 \times f_1 \sim 30 \times f_1$	2	2	6
$30 \times f_1 \sim 40 \times f_1$	2	2	4

表 3: 周波数掃引試験の試験レベル

周波数範囲 f	周波数ステップ Δf
$0.33 \times f_1 \sim 2 \times f_1$	$0.1 \times f_1$
$2 \times f_1 \sim 20 \times f_1$	$0.2 \times f_1$
$20 \times f_1 \sim 40 \times f_1$	$0.5 \times f_1$

表 4: 周波数掃引試験と中間高調波試験の周波数ステップ

4.3 個別高調波と中間高調波

個別高調波試験と中間高調波試験はセットで適用される。

4.3.1 個別高調波

2~40 次のそれぞれの整数次の高調波について、表 5~表 7 で、また図 8 の棒グラフで示したようなレベルの整数次の高調波をそれぞれ 5 秒間重畳し、1 秒間の休止を置いて次の高調波を重畳する。

9 次までの 3% 以上の高調波は 0° と 180° の位相角で (図 10~図 12)、その他の高調波は 0° の位相角で重畳する (図 13)。

次数 h	試験レベル (% U_1)		
	クラス 1	クラス 2	クラス 3
5	4.5	9	12
7	4.5	7.5	10
11	4.5	5	7
13	4	4.5	7
17	3	3	6
19	2	2	6
23	2	2	6
25	2	2	6
29	1.5	1.5	5
31	1.5	1.5	3
35	1.5	1.5	3
37	1.5	1.5	3

表 5: 個別高調波の試験レベル — 3 の倍数以外の奇数次高調波

次数 h	試験レベル (% U_1)		
	クラス 1	クラス 2	クラス 3
3	4.5	8	9
9	2	2.5	4
15	—	—	3
21	—	—	2
27	—	—	2
33	—	—	2
39	—	—	2

表 6: 個別高調波の試験レベル — 3 の倍数の高調波

次数 h	試験レベル (% U_1)		
	クラス 1	クラス 2	クラス 3
2	3	3	5
4	1.5	1.5	2
6	—	—	1.5
8	—	—	1.5
10	—	—	1.5
12~40	—	—	1.5

表 7: 個別高調波の試験レベル — 偶数次高調波

4.3.2 中間高調波

電源周波数が 50 Hz の場合は表 8 や図 8 で示したようなレベルの、また 60 Hz の場合は表 9 で示したようなレベルの中間高調波を、表 4 に示したような周波数ステップで周波数掃引しながら重畳する。

個別高調波試験と同様、この試験もそれぞれの周

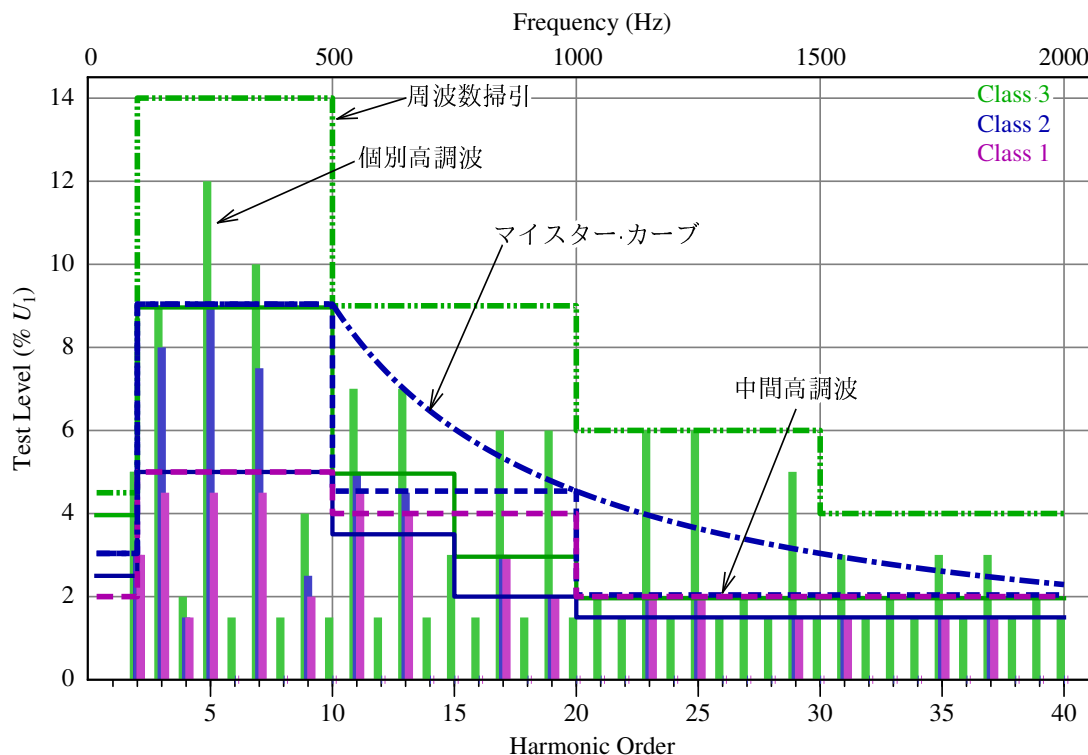


図 8: 試験レベル (50 Hz)

波数の中間高調波を 5 秒間重畳し、1 秒間の休止を置いて次の周波数の中間高調波を重畳することで行なう。

周波数範囲 f (Hz)	試験レベル (% U_1)		
	クラス 1	クラス 2	クラス 3
16~100	—	2.5	4
100~500	—	5	9
500~750	—	3.5	5
750~1000	—	2	3
1000~2000	—	1.5	2

表 8: 中間高調波試験の試験レベル (50 Hz)

周波数範囲 f (Hz)	試験レベル (% U_1)		
	クラス 1	クラス 2	クラス 3
20~120	—	2.5	4
120~600	—	5	7.5
600~900	—	3.5	5
900~1200	—	2	3
1200~2400	—	1.5	2

表 9: 中間高調波試験の試験レベル (60 Hz)

4.4 マイスター・カーブ

マイスター・カーブは、クラス 2 で、マイスター・カーブの適用が必要な場合に適用される。

マイスター・カーブは、通常、電源系統上でリップル・コントロール^{†8}が用いられるかも知れない場合に必要となる。

この試験では、電源周波数が 50 Hz の場合は 16.5 Hz~20 kHz、60 Hz の場合は 16.5 Hz~24 kHz の周波数範囲について、表 10 で、また図 8 の「マイスター・カーブ」のラインで示したようなレベルの高調波や中間高調波を、表 11 に示したような周波数ステップで周波数掃引しながら重畳する。個別高調波試験や中間高調波試験と同様、この試験もそれぞれの周波数の妨害を 5 秒間重畳し、1 秒間の休止を置いて次の周波数の妨害を重畳することで行なう。

マイスター・カーブの試験レベルはクラス 2 の周波数掃引の (また、個別高調波や中間高調波の) 試験レベルよりも高く (図 8)、図 2 に示したフローで

^{†8} リップル・コントロールは電力線に 100 Hz~3 kHz 程度の信号を意図的に注入して信号を送る技術で、典型的には電力会社側から需要家側の機器を制御する (例えば電力需要が高い時に重要性の低い機器を停止させる、など) ために用いられる。[3] なども参照。

は、この試験を適用する場合は周波数掃引や個別高調波/中間高調波の試験の適用は不要となっている。

周波数範囲 f (Hz)	試験レベル (% U_1)
16.5~100	3
100~500	9
500~1000	4500/ f
1000~2400	4500/ f

表 10: マイスター・カーブ試験の試験レベル (クラス 2)

周波数範囲 f (Hz)	周波数ステップ Δf (Hz)
16.5~100	5
100~500	10
500~1000	10
1000~2400	25

表 11: マイスター・カーブ試験の周波数ステップ

5 試験システム

妨害の印加は、必要な能力を持つ、所定の歪んだ電源電圧波形を発生することのできる試験用電源(所定の波形を外付けの任意波形発生器などから入力することもある) から給電することで行なうことができる (図 9)。

重畳された高調波の振幅は IEC 61000-3-2^{[2][5]} の測定で用いられるものと同様の高調波アナライザ(但し、IEC 61000-3-2 の測定では電源電流を分析するが、この試験での確認では電圧波形を分析する)を用いて確認することができる。

これに加えて、オシロスコープでの電圧波形の確認、また電流プローブを用いた電流の監視^{†9}も有用となるかも知れない。

^{†9} 電流の大きさや電流波形を監視することで、他に明らかな症状が出ていない時に、例えば電流の異常な増加、異常なスイッチングなどの変調を見付けることができるかも知れない。

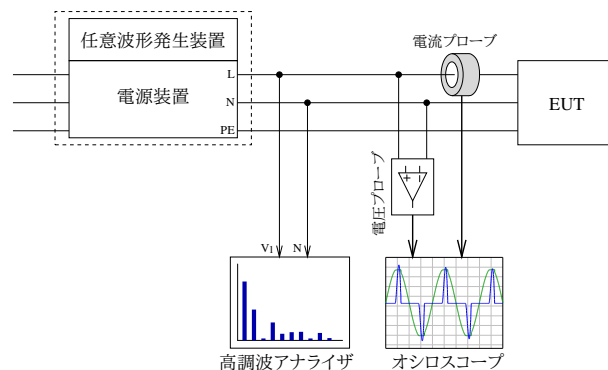


図 9: 試験システムのイメージ

6 補足

6.1 高調波や中間高調波を重畳した波形の例

高調波や中間高調波を重畳した波形の例を図 11~図 16 に示す。

重畳する高調波や中間高調波に応じて波形に次のような特徴が見られる:

- 整数次の高調波のみを重畳した場合、各サイクルの波形の形状は同一の繰り返し波形となる (図 10~図 13)
- 奇数次高調波のみを重畳した場合は正の半サイクルと負の半サイクルの波形は同一となる (図 11~図 13) が、偶数次高調波を重畳した場合はこの対称性は崩れる (図 10)
- 中間高調波を重畳した場合、各サイクルの波形の形状に違いを生じる (図 14~図 16、特に図 16)
- 基本周波数に近い中間高調波を重畳した場合、その周波数の差に応じた周波数での振幅の動揺、すなわち電圧フリッカが発生する (図 14~図 15)

6.2 高調波の位相角の影響

この規格では個別高調波は 0° と 180° (9 次までの 3% 以上の高調波のみ) の位相角で重畳するように述べられている。

実際の電源波形は高調波は他の位相角で重畳されているかも知れず、この位相角が変化すると図 17~図 19(わかりやすくするために高調波成分

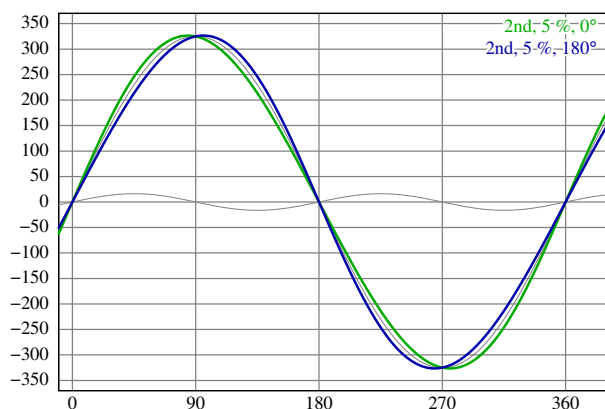


図 10: 個別高調波 — 2次, 5%, $U_{rms} = 230$ V (クラス 3)

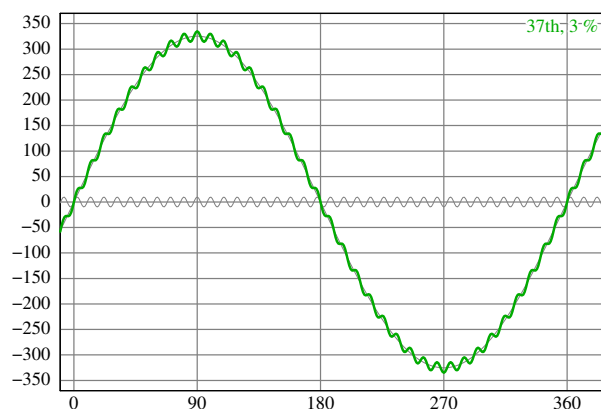


図 13: 個別高調波 — 37次, 3%, $U_{rms} = 230$ V (クラス 3)

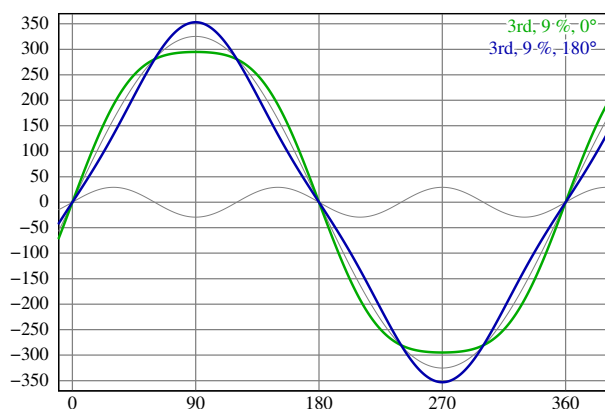


図 11: 個別高調波 — 3次, 9%, $U_{rms} = 230$ V (クラス 3)

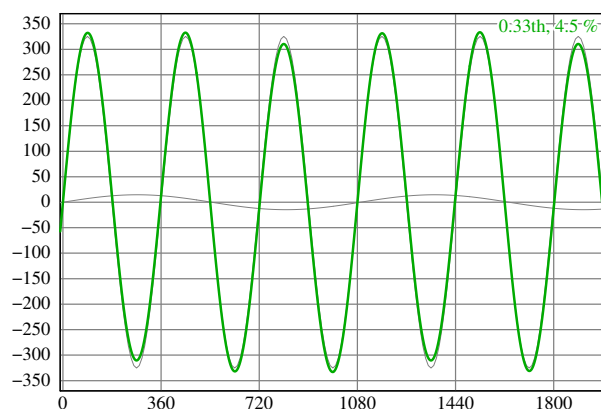


図 14: 中間高調波 — 0.33次, 4.5%, $U_{rms} = 230$ V (周波数掃引, クラス 3)

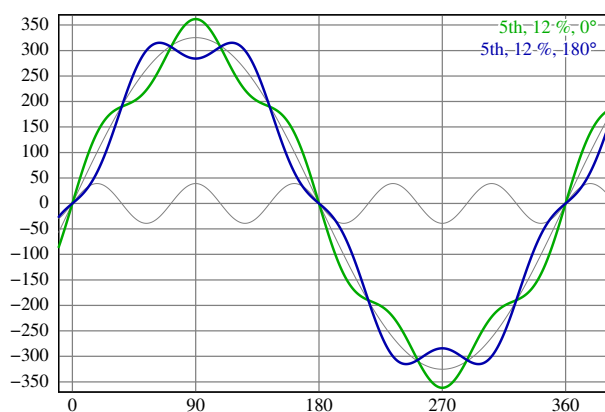


図 12: 個別高調波 — 5次, 12%, $U_{rms} = 230$ V (クラス 3)

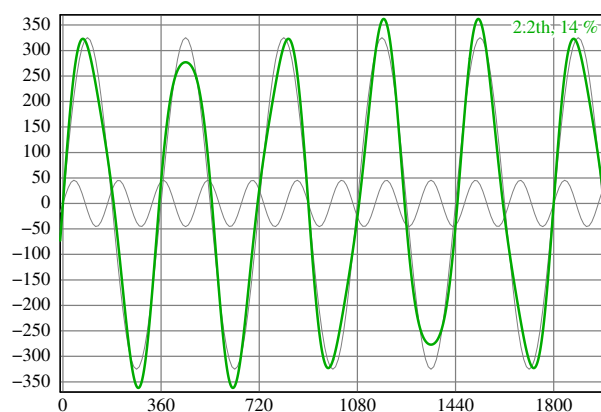


図 15: 中間高調波 — 2.2次, 14%, $U_{rms} = 230$ V (周波数掃引, クラス 3)

の振幅を 30% としている) に例示するように、重畳されている高調波の次数と振幅が同一であっても合成された波形の形状は大きく変化する。

ここではこれ以上は述べないが、複数の高調波を適切な振幅と位相角で重畳すれば任意の繰り返し波

形を作ることができ、逆に任意の繰り返し波形はそのような高調波に分解することができる。

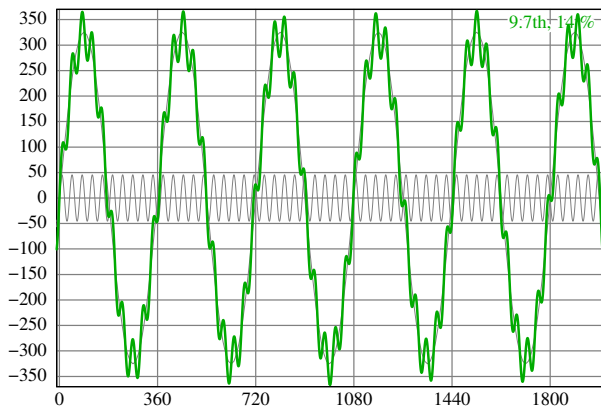


図 16: 中間高調波 — 9.7 次, 14 %, $U_{rms} = 230$ V (周波数掃引, クラス 3)

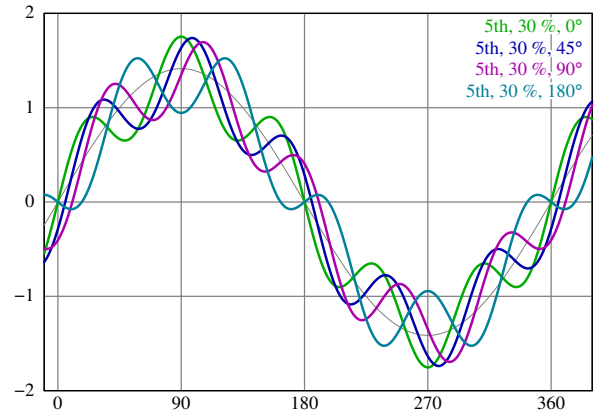


図 19: 高調波の位相角の影響 — 5 次, 30 %

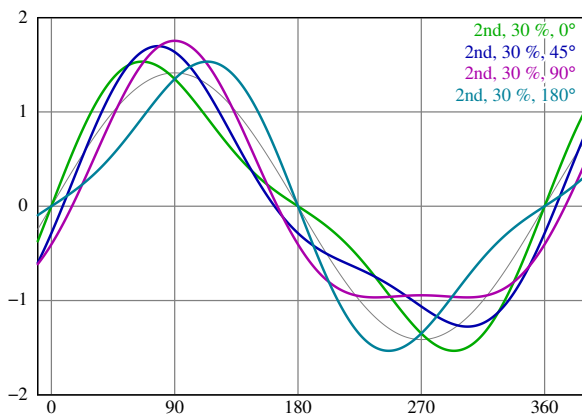


図 17: 高調波の位相角の影響 — 2 次, 30 %

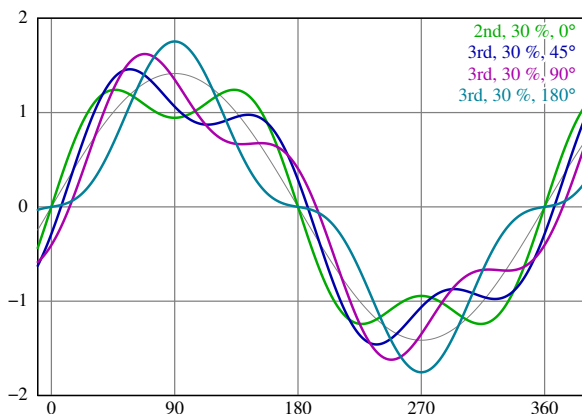


図 18: 高調波の位相角の影響 — 3 次, 30 %

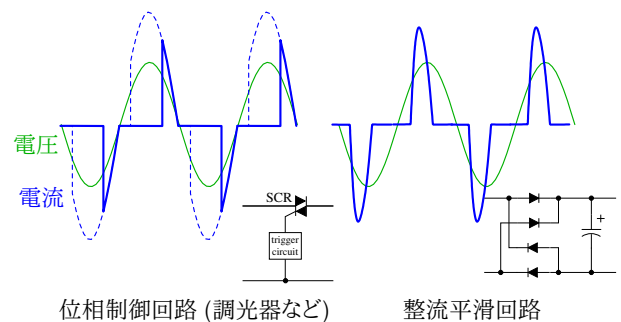


図 20: 高調波を多く含む電流波形の例

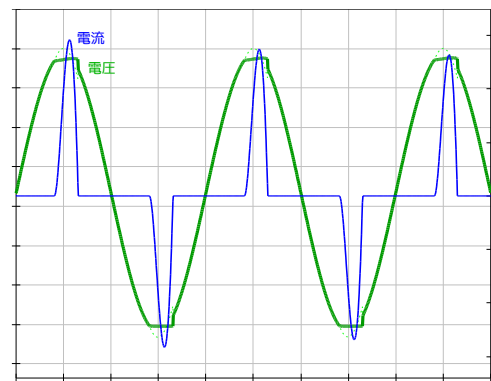


図 21: コンデンサ・インプット型整流平滑回路の入力電流に伴う電圧波形の歪みの例 (シミュレーション)

6.3 電源電圧の高調波歪みの発生

整流平滑回路や位相制御回路などの電源電流波形は図 20 に例示するように著しく歪んだ、すなわち高調波成分を多く含むものとなることがあり、これが電源の有限なインピーダンスを流れると図 21 に例示するように電源電圧波形にも有意な歪みを生じる。

整流平滑回路や位相制御回路などは主に整数次の高調波成分のみを発生させるが、溶接機やアーク炉、また電源波形と非同期で電力をスイッチングするある種の電力変換器や電力制御装置のようなものは著しい中間高調波も発生させる。

電源系統によっては、電源に意図的に 100 Hz ~ 3 kHz 程度の信号を重畳させるリップル・コントロール¹⁸ が用いられることもある。

6.4 UPS などの電圧波形

UPS (無停電電源装置) やインバータ^{†10}などは正弦波ではなく矩形波 (図 22) や図 24 や図 26 に示す “modified square wave” (modified sine wave、simulated sine wave などとも呼ばれる) のような波形を発生するものが少なくない。^{[4]†11}

図 24 の波形のスペクトラムを図 25 に示すが、特に低い整数次の高調波のレベルがこの規格のクラス 3 の個別高調波の試験レベルを大きく超えているのがわかるだろう。

従って、このような電源に接続される可能性がある場合、この規格のクラス 3 よりもかなり高い試験レベルの適用の考慮も必要となるかも知れない。

図 26 で示すように複数の電圧レベルから成る階段状の波形とすればそれに応じて高調波は低減されるが、図 25 に示すように、レベルの数が少ない場合はそれでも相当のレベルの高調波を含む。

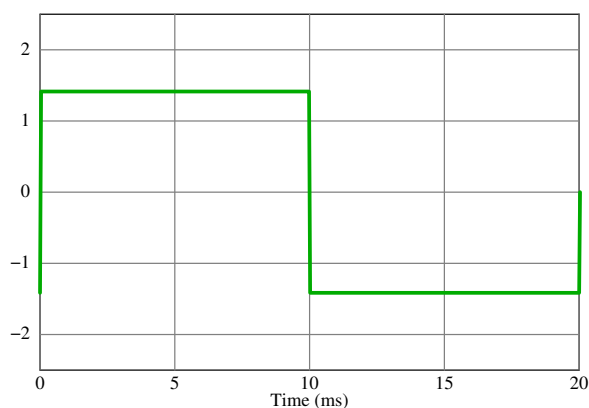


図 22: 矩形波

7 参考資料

- [1] IEC 61000-4-13:2002+A1:2009+A2:2015, *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*
- [2] IEC 61000-3-2:2018, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*

^{†10} 例えば車両の 12 V 電源から 100 V や 230 V などの交流電源を作るようなもの。

^{†11} このタイプのもは正弦波に近い波形を発生するものよりも小形、かつ安価とできるが、高調波に伴う、またその他の理由に伴う問題の原因となることがある。

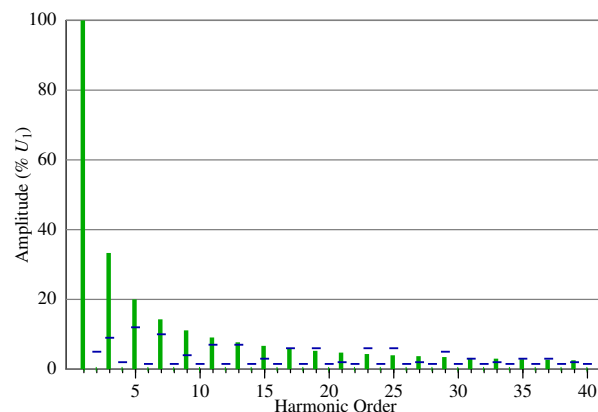


図 23: 図 22 の波形のスペクトラム (棒グラフ) と IEC 61000-4-13 個別高調波 クラス 3 試験レベル (横線)

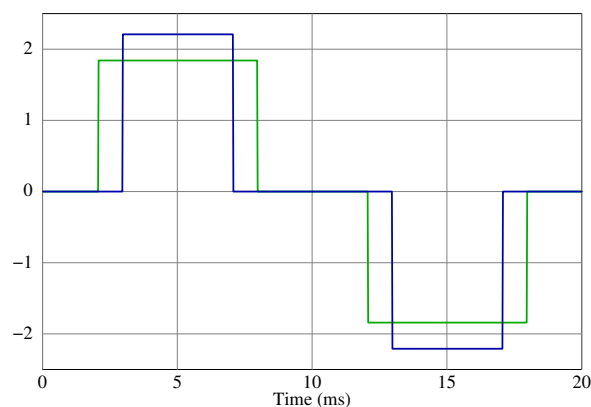


図 24: “modified square wave” の波形の例

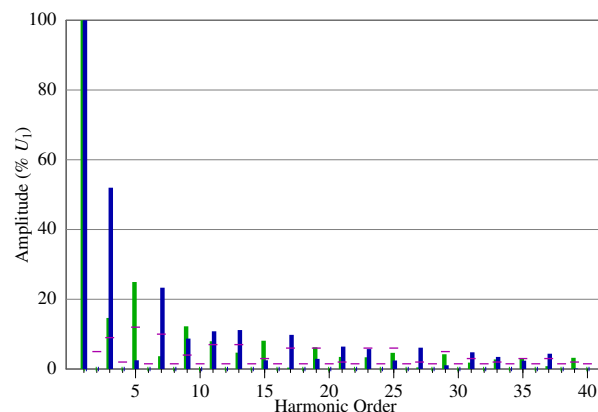


図 25: 図 24 の波形のスペクトラム (棒グラフ) と IEC 61000-4-13 個別高調波 クラス 3 試験レベル (横線)

- [3] *Ripple Injection Load Control Systems (Technical Note 14)*, Australian Power Quality & Reliability Centre, 2014,

http://www.elec.uow.edu.au/apqrc/content/technotes/UOW019_Tech%20Note%2014_AW_screen.pdf

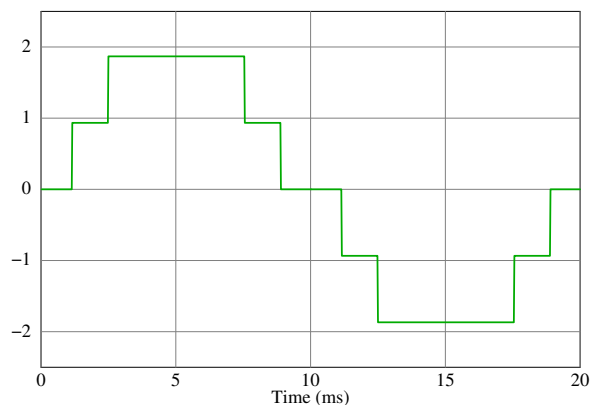


図 26: “modified square wave” の波形の例 (2)

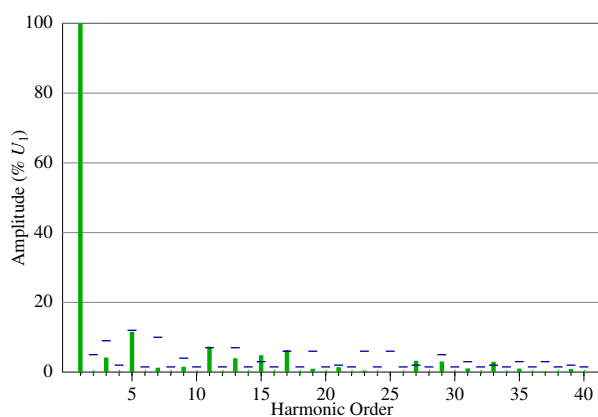


図 27: 図 26 の波形のスペクトラム (棒グラフ) と IEC 61000-4-13 個別高調波 クラス 3 試験レベル (横線)

[4] *A Comparison of Output Waveforms of Different Alternating Current Sources and Uninterruptible Power Supplies of Various Brands*, Abdul Rauf Bhatti et al., Life Science Journal, 2012,

https://www.researchgate.net/publication/232613631_A_Comparison_of_Output_Waveforms_of_Different_Alternating_Current_Sources_and_Uninterruptible_Power_Supplies_of_Various_Brands

[5] IEC 61000-3-2, -3-12 の概要, 株式会社 e・オータマ, 佐藤, 2020,

<http://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>