高調波電流の国際規格と測定技術　測定技術編

～9kHzまでの広帯域化を実現した高調波測定技術～

横河計測株式会社
技術開発本部　第1技術部
塩田 敏昭

近年、高効率なスイッチング電源を搭載した機器の大幅な普及により、電力系統に流れる電流波形にひずみが生じ、そのことによる高圧系統システムでの障害が多発している。その障害防止を図るために電気電子機器に対して厳しい高調波電流の規制が課せられている。

従来は規制が及ばない帯域となっていた2k~9kHzの不要な信号に対して、今後、規格の制定が想定されることから、商用周波数からその高い帯域を含めた高精度な高調波測定技術を、最新のプレシジョンパワーアナライザWT5000で実現した。本稿ではその詳細に関して紹介する。

1．9kHzまでの高調波電流

電気電子機器のスイッチング電源、力率改善回路、電力変換装置のインバータ部などのスイッチング周波数は電源周波数とは非同期で数kHzから数百kHzとなっており、このスイッチング周波数によるノイズが伝導ノイズとして系統電源へ伝搬することが懸念されている。

低周波のエミッション規格としては、高調波電流の規格であるIEC61000-3-2で40次（基本波が50Hzの時2kHz）までの高調波電流に対する限度値が規定されているが、2kHzから9kHzについては規制されていない。高調波の測定技術について書かれたIEC61000-4-7の付属書B（参考）にて、9kHzまでの測定について記述されているのみとなる。

WT5000の9kHzまでの高調波電流測定では、このIEC61000-4-7の付属書Bを参考に従来の高調波電流測定の周波数範囲を拡大することにより実現している。

2．WT5000における高調波測定

従来の50Hz~2kHzまでの高調波測定に加え、WT5000では2kHz～9kHzの高調波測定にも対応できるようにするため、50Hz～10kHzまでの高調波測定をできるようにした。

（なお、以降の説明は、WT5000の設定項目であるIEC61000-4-7のEdition選択をEdition2.0またはEdition2.0A1に設定し、基本波50Hz時を例として行う。基本波60Hz時や、Edition1.0設定では異なる部分もある。）

そのためには、測定できる次数を従来の50次（50Hz×50次＝2.5kHz）までではなく200次（50Hz×200次＝10kHz）とし、さらに高調波測定用のサンプリング周波数を上げ、1ウィンドウ（基本波10波）あたりのサンプル数を32768点とすることにした。このことにより、カットオフ周波数30kHzのアンチエリアシングフィルターを用いて、9kHzでのフィルターによる減衰量を抑えるとともに、9kHzまでの折り返しを-50dB以下とすることができた。

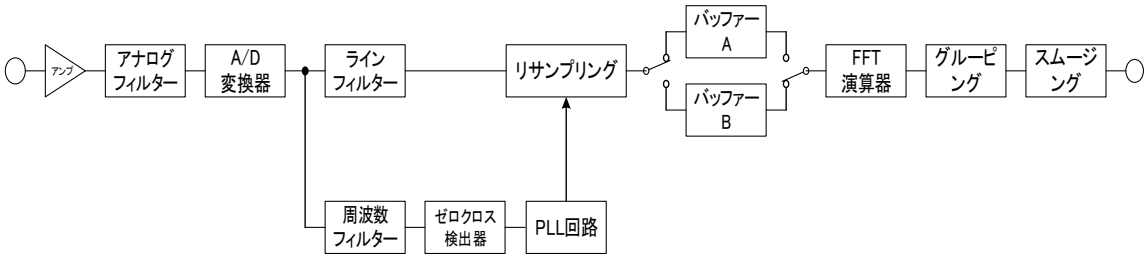

図1　WT5000のIEC高調波モードのブロック図

WT5000では、IEC61000-4-7に準拠した高調波測定を実現するために、図1のようなブロック構成となっている。

入力された電圧、または電流のアナログ信号は、アンプで正規化され、アナログフィルター（カットオフ周波数1MHz）を通過後に、A/D変換器でサンプリング周波数10MS/sで、18bitのディジタル値に変換される。

入力信号から基本周波数を抽出するために、周波数フィルター（ディジタルフィルター、カットオフ周波数100Hz）を通過後、ゼロクロス検出器でゼロクロスを検出し、PLL回路で基本周波数の3276.8倍の高調波測定用サンプリング周波数を生成する。

一方、高調波信号の方は、ラインフィルター（ディジタルフィルター、カットオフ周波数30kHz）を通過後に、高調波測定用サンプリング周波数でリサンプリングし、バッファーに保存する。バッファーは32768データ分が2面あり、A面、B面、A面、…の順に保存する。1つの面がフル（一杯）になったところで、その面のデータを使ってFFTを実行し、ウィンドウ幅が200ms（50Hz基本波10波）であれば、5Hz毎の周波数成分に変換される。

中間高調波成分も含まれたFFT結果は、規定されたグルーピング処理を行い、その後、スムージングを行って、高調波測定結果となる。

① アナログフィルター

A/D変換器が10MS/sで動作するので、カットオフ周波数1MHzのアナログのローパスフィルターで事前に帯域制限を行って、サンプリング周波数の1/2の5MHzで折り返す成分の影響を抑えている。

② PLL回路

入力された波形の基本周波数から、高調波測定用サンプリング周波数を生成する。基本周波数が50Hzの時は、基本周波数の3276.8倍の周波数（50Hz×3276.8倍＝163.84kHz）がサンプリング周波数となる。

③ ラインフィルター

高調波測定用サンプリング周波数で、リサンプリングされるので、カットオフ周波数30kHzのディジタルローパスフィルターで事前に帯域制限を行っている（図2）。

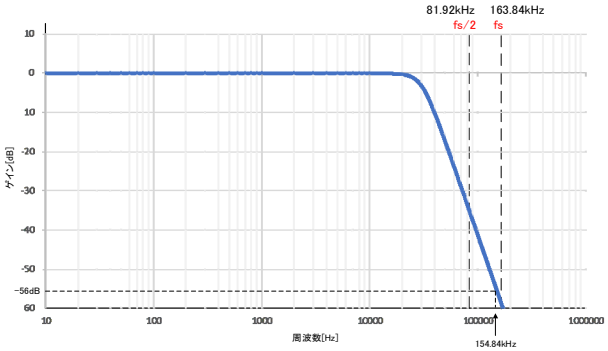

図2　WT5000のラインフィルターの減衰特性

サンプリング周波数163.84kHzの1/2以上の周波数で折り返しが発生するが、9kHzへの折り返しは、(163.84kHz-9kHz=)154.84kHzでのフィルターの減衰量に一致するため、-56dBとなり、規格で要求されている-50dB以下を満たしている。また、32768ポイントFFTにより高調波測定用サンプリング周波数が約164kHzと高くできたので、フィルターのカットオフ周波数も30kHzと高くでき、その結果、解析周波数9kHzでの減衰量は0.3%と小さなものとなっている。

比較のために、従来機種（WT3000E）のIEC高調波測定モードでのラインフィルター（カットオフ周波数5.5kHz）の減衰特性を図3に示す。

従来機種では、FFTポイント数が9000のため、高調波測定用サンプリング周波数は50Hz×9000/10波=45kHzとなっている。このため、フィルターのカットオフ周波数を低くしなければならず、9kHzでは約20dBの減衰があり、9kHzまでの高調波解析はできない。

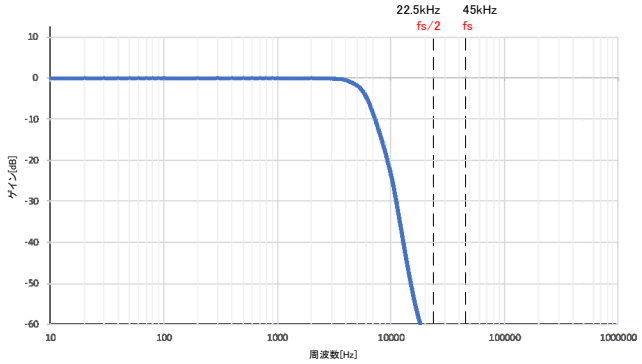

図3　WT3000Eのラインフィルターの減衰特性

④ リサンプリング

PLL回路で生成された高調波測定用サンプリング周波数で、高調波信号をリサンプリングする。これにより、基本波10波で構成される1ウィンドウあたりのサンプル点数が32768点となる（図4）。

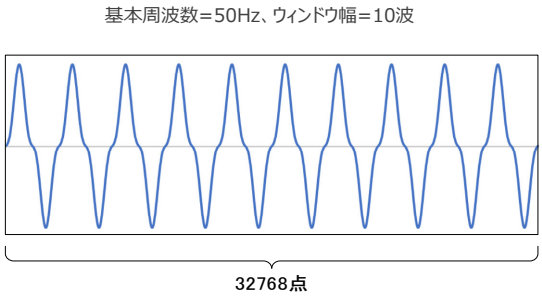

図４　1ウィンドウあたりのサンプル点数

⑤ バッファーA/B

バッファーはA面/B面の２面を持ち、それぞれ1ウィンドウ分の32768点のサンプルデータが保存できる。A面のバッファーがフルになったら、次はB面にサンプルデータを貯め、B面がフルになったら、次はA面に貯めることを繰り返す。

１つの面のバッファーがフルになったところで、その面のデータを使ってFFTを実行する。バッファーが2面あることで、1面をFFT演算でデータを使用しているときでも、もう１面に、現在のサンプルデータを取り込み続けられ、サンプルデータの取りこぼしがないようになっている。ウィンドウ間をノーギャップ、ノーオーバーラップとするために必要な処理となる。（図5）

⑥ FFT演算器

32768ポイントのFFT演算を行う。実際には、最大6ch（電圧、電流×3入力エレメント）のFFT演算を時分割で行うが、すべてのFFT演算が次のウィンドウの時間内に処理を完了しなければならない。WT5000では、32768ポイントFFTに最適な演算デバイスを使用し、さらに処理を工夫することで、時間内に完了させることができたため、ウィンドウ間にギャップのない測定が実現できている（図5）。

このように、FFT演算までをリアルタイムで実行することにより、本体に必要なメモリは最小限に抑えながらも、高調波測定結果を通信でPCアプリケーションソフトウェアへ出力することで、ウィンドウ間にギャップのない状態で、長時間の高調波測定が可能となっている。

⑦ グルーピング

(1)式により、中間高調波を含めたグルーピング計算を行う。

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2}Y_{C,(N\times h)-N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N\times h)+k}^2 + \frac{1}{2}Y_{C,(N\times h)+N/2}^2$$

(1)*1)

ここで、$Y_{g,h}$ は高調波次数hの高調波グループ、$Y_{C,(N\times h)+k}$ はFFT演算結果の各スペクトラムの実効値、$(N\times h)+k$ はスペクトラム成分の次数、Nは50Hzの時10で60Hzの時12である。IEC61000-4-7 Edition 2.0A1では2次高調波以上の中間高調波がグルーピングの対象となる。

⑧ スムージング

時定数が1.5秒となる1次ローパスフィルターと等価のスムージング処理を行う。図6にスムージング処理内容と基本周波数50Hzでウィンドウ幅10波、60Hzでウィンドウ幅12波の時の係数を示す。

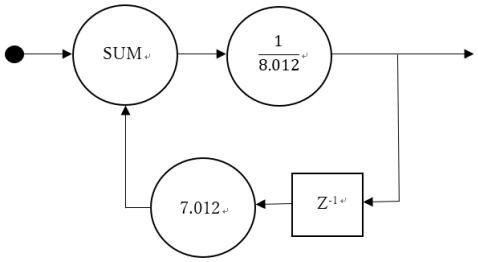

図6 スムージング*2)

3. アプリケーションソフトウェアによる限度値判定

IEC61000-3-2では、クラスごとに許容される高調波電流の限度値が規定され、緩和処置によってその限度値が読み替えられるなど大変複雑であることから、弊社ではこれに対応したWT5000専用のソフトウェアを用意した。

主な特長を列挙すると以下のとおりである。

・IEC61000-3-2、IEC61000-3-12、JIS C61000-3-2の高調波電流規格に対応しており、PCで制御・測定ができ、特別な知識が無くても対応する機器の限度値判定とその報告書の作成ができる。

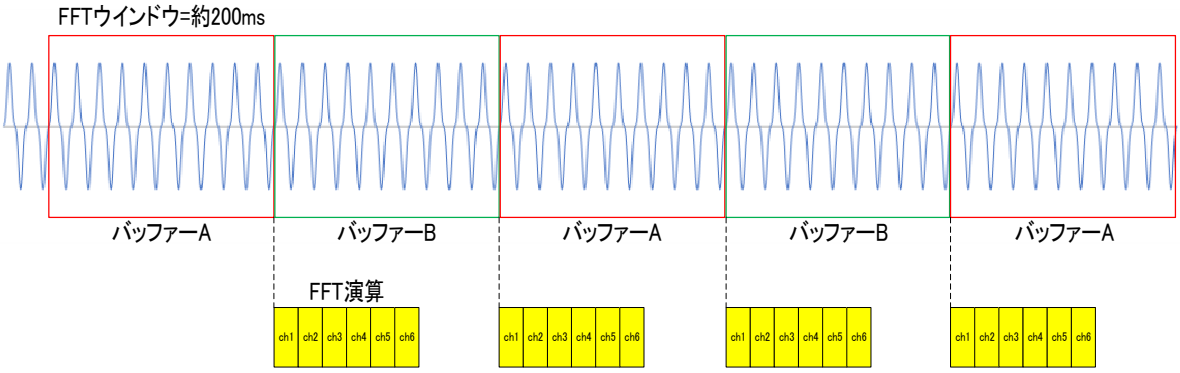

図5 ノーギャップ、ノーオーバーラップ処理（IEC61000-4-7で規定される測定器に対する要求）

・IEC規格は頻繁に改訂されているため、常に最新の規格への対応を可能としている。

・PCでデータを管理するため、測定器内部のメモリ容量に依存せず、長時間の観測と記録を実現している。

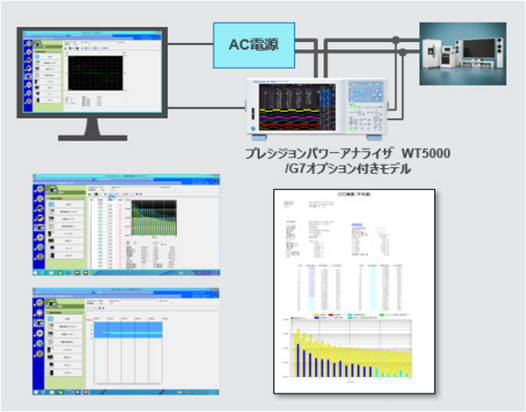

図7 高調波測定のシステム例と表示、報告書例

4. まとめ

WT5000において、IEC規格に従い高調波電流を測定するモードで、9kHzまでの高調波電流の測定が可能となった。

測定帯域への折り返しの影響は、カットオフ周波数30kHzのラインフィルターを使用することとサンプリング周波数を基本周波数の3276.8倍とすることにより、規格で要求されている-50dB以下とすることができた。9kHzにおけるフィルターによる減衰量も小さなものとなっている。

9kHzまでの測定には、従来機種の約4倍の32768ポイントFFTが必要となったが、最適な演算デバイスの使用や処理を工夫することで、ノーギャップ、ノーオーバーラップでの処理を実現できた。

WT5000の9kHzまでの高調波電流測定が電気電子機器の電磁両立性のエミッション測定として活用されることを期待する。

参考文献

・IEC61000-4-7 第2.0版：2002

*1)：5.5.1 Grouping and smoothing Expression（8）

*2)：5.5.1 Grouping and smoothing Figure 5

7 Transitional period Table 2

横河計測株式会社

YMI-KS-MI-S07

本 社 〒192-8566 東京都八王子市明神町4-9-8 TEL：042-690-8811 FAX：042-690-8826

ホームページ https://www.yokogawa.com/jp-ymi/

製品の取り扱い、仕様、機種選定、応用上の問題などについては、カスタマサポートセンター 0120-137-046 までお問い合わせください。

受付時間：祝祭日を除く、月～金曜日／9:00～12:00、13:00～17:00 E-mail：tmi-cs@csv.yokogawa.co.jp

記載内容は 2021年4月6日 現在のものです。また、お断りなく変更することがありますのでご了承ください。価格には別途消費税が加算されます。

All Rights Reserved. Copyright © 2002, Yokogawa Electric Corporation

Copyright © 2021, Yokogawa Test & Measurement Corporation [Ed:01/d]