パワエレにおける時間周波数解析の適用

道平雅一 橋本卓也 森田二郎 津吉彰 尼子邦之 大江武彦

(神戸市立工業高等専門学校)

Application of Time-Frequency Analysis for Power Electronics

Masakazu MICHIIHIRA, Takehiko OE, Kazushi HISAYAMA

Kuniyuki AMAKO, Akira TSUYOSHI (Kobe C.C.T.)

ABSTRACT

In recent years, the harmonics and EMI noise sent out from an electric power conversion system are getting a great deal of attention in electromagnetic environment problems. The considerations of this problem have been getting important by recent significant improvement of auto-arc-suppressing device and switching speed. Therefore, there is need to do a detail frequency analysis such as transient phenomena. So, we have proposed the analytic technique using Wavelet-transform which is possible to catch a phenomenon from the both sides of the time and the frequency. In this paper, we analysed the actual measured data in the switching interval by using Wavelet-transform. Then, based on obtained result, we describe the validity of Wavelet-transform and the application to the power electronics field.

Keywords : EMI noise, Wavelet-transform, Fourier-transform, power converter

1. まえがき

電力用半導体デバイスをスイッチングさせて電圧、電流または電力をコントロールするパワエレ機器は、程度の差はあれ原理的に高調波や EMI ノイズを発生する。省エネルギーや制御の高度化にはパワエレ機器は非常に有効なものであり、今後も一層の普及が予想される。従って、それらから発生する高調波や EMI ノイズに対して十分考慮しなければ EMC(Electro Magnetic Compatibility: 電磁環境両立性) 問題を新たに生じさせる恐れがあり、電磁環境問題対策はパワエレ分野における最重要課題となりつつある。

的確で効率的な高調波や EMI ノイズ対策を施すためにはそれらの発生箇所の特定制や伝搬の様子も把握することが重要になると考えられるが、現在、周波数解析で主に用いられているフーリエ変換による周波数解析では、時間情報が失われるためそれらを望むことはできない。これに代わる解析手法として、ウェーブレット変換による時間周波数解析を適用すると、スイッチングに伴う現象を時間と周波数の両面から捉えることができるようになるため、時間経過とともに現象が変化するような時系列信号の解析に適していると考えられる。これは、パワエレ機器が発する高調波の瞬時値解析が可能になることになり、EMC 問題に対する新たな知見も得られると考えられる。本論文では、これまでに変換器内部の高調波発生過程や、その伝達形態の解明を試みた結果を紹介するとともに、ウェーブレット変換のパワーエレクトロニクス分野への応用とその有効性について報告する。

2. ウェーブレット変換手法

ウェーブレット変換は、後述するマザーウェーブレットと呼ばれる基底関数により連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換に大別される。連続ウェーブレット変換は、時間周波数解析であるという特徴を利用して時系列のデータ分析に、離散ウェーブレット変換は多重解像度解析であるという特徴を利用した画像圧縮と符号化の分野へ応用されている。ここでは、今回適用している連続ウェーブレット変換について述べる(以後、連続ウェーブレット変換のことを単にウェーブレット変換と記述する)。ウェーブレット変換に用いられる関数 $\psi(t)$ は、ウェーブレット変換の全てを特徴づける重要な関数で、マザーウェーブレットあるいはアナライジングウェーブレットと呼ばれており、局在を表す(1) 式の条件を満たしている。ここで $\hat{\psi}(\omega)$ は(2) 式に示す $\psi(t)$ のフーリエ変換である。一般に用いられるような遠くで速くゼロになる関数に関しては、同値となる(3) 式が用いられる。(3) 式は、 $\psi(t)$ が直流成分を持たない、すなわち振動的であるということを示している。

$$C_{\psi} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = \text{有限} \quad (1)$$

$$\hat{\psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} \psi(t) dt \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

ウェーブレット変換の基底関数であるマザーウェーブレット $\psi(t)$ には幾つかの種類があるが、本研究では現象

図1 マザーウェーブレットの実数部

の生起時間などの不連続点を的確に捉えることができるという特長を持ち、連続ウェーブレット変換において広く用いられている Gabor のマザーウェーブレット ((4) 式) を適用している。このマザーウェーブレットは、時間及び周波数領域での不確定性の積を最小にする関数として知られており、無駄の少ない時間周波数解析を可能としている。(4) 式の σ は、時間軸上におけるマザーウェーブレットの局在性、すなわち窓幅を決定する定数であり、対象とする時間及び周波数の解析範囲に応じてそれぞれの領域における不確定性関係を十分に考慮し決定する必要がある。本研究では、解析対象の波形に対して試行錯誤的に得た妥当と見なせる $\sigma = 8$ を用いた。(4) 式の実数部分を図 1 に示す。

$$\psi(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{-it} \quad (4)$$

ウェーブレット変換は、図 1 に示すようなマザーウェーブレットを横方向に拡大・縮小しながら時間軸上で移動させ、それと信号との積をとることにより局所的な周波数を切り出している。つまりウェーブレット変換は、この拡大・縮小・移動を行うため変数 t をスケールパラメータ a とトランスレートパラメータ b により $(t-b)/a$ と置き換えて、マザーウェーブレットを $\psi(\frac{t-b}{a})$ とした関数の組 $\psi_{a,b}(t)$ 、すなわち、(5) 式を積分核とした積分変換により行われる ((6) 式)。ここで $1/a$ は周波数を意味し、 b は横軸の平行移動、すなわち時間軸上におけるマザーウェーブレットの中心位置であることを意味している。ここで $1/\sqrt{a}$ は各スケール・パラメータにおいて同一のエネルギーとなるための正規化定数である。従って、関数 $f(t)$ のウェーブレット変換係数 $W_\psi(a,b)$ は(7) 式のように定義される。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

$$W_\psi(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}^*(t) f(t) dt \quad (6)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (7)$$

これらの定義により行うウェーブレット変換は、時系列データとマザーウェーブレットとの相関処理及びフーリ

エ空間におけるフィルタリングを行うことになるため次のような特徴を持つことになる。

1. 高周波成分に対して、時間分解能が高く周波数分解能が低い。また、低周波成分に対して、時間分解能が低く周波数分解能が高い
2. マザーウェーブレットが局在化した関数であり、直流成分を含まないため信号の不連続点を敏感に捉えることができる。

以上のことから、ウェーブレット変換が信号の不確定性関係を考慮に入れた最も無駄の少ない時間周波数解析であることが分かる。

2.1 テスト波形によるウェーブレット変換とフーリエ変換の比較 ここでは、フーリエ変換による周波数解析結果とウェーブレット変換による時間周波数解析結果の比較検討を行うため、図 2(a) に示す変換器出力波形を想定したテスト波形に対して行った 2 つの手法の解析結果を示す。

表 1 テスト波形の時間周波数構成

	次数 (th)	時間 (p.u.)	振幅 (p.u.)
	1	0~1	1.0000
	40	0~1	0.0250
	100	0.4~1	0.0525 (減衰波)
	180	0.5~0.525	0.1250

(a) テスト波形

(b) フーリエスペクトラム

図 2 テスト波形

図3 テスト波形の時間周波数解析結果 (等高線表示)

用いたテスト波形は、表1に示すような周波数と現象開始時間を持つ異なる4つの波形を合成したものを用いた。図2(b)は通常のフーリエ解析結果、図3、4はウェーブレット解析結果を示す。フーリエ解析結果からは、40MHz、100MHzの振幅値はほぼ等しくなっていることが理解できる。しかし実際は、表1に示しているように発生時間及び振幅も異なり、さらに40MHzの成分は一定の振幅で発生しているのに対して、100MHzの成分の振幅は減衰しているがこれらの違いはフーリエ結果からだけでは知ることはできない。また、解析区間でインパルス的に発生している180MHzの成分は、図2(b)のフーリエ解析結果からはその存在を認識することは困難である。

一方、ウェーブレット解析結果からは、表1に示すように40MHzの成分が時間軸に関わらず一定の振幅で発生し、100MHzの成分が $t = 0.4$ で発生し減衰していく様子がはっきりと確認できる。また、180MHzの成分が $t = 0.5 \sim 0.525$ の期間でインパルス的に発生していることも確認できる。さらに、 $t = 0.4, 0.5, 0.525$ の3つの点で現象の不連続点が確認できるが、これは新たな現象の生起時間であると特定することができる。最後に、フーリエ解析結果とウェーブレット解析結果を比較すると、前述したようにウェーブレット変換はフーリエ変換より周波数分解能が劣っていることが分かる。

以上のように、時間周波数解析により得られたこれらの結果は、表1に示した現象とよく一致することが理解できる。これらは、フーリエ解析結果だけでは知ることのできなかった情報であり、ウェーブレット解析を用いた時間周波数解析をパワーエレクトロニクス分野へ適用することは新たな知見を得るために有効であると言える。

3. パワーエレクトロニクス機器から発生する高調波の時間周波数解析

ここでは、これまでに電力変換装置から得られたデータに時間周波数解析を行った結果について数例紹介する。

(a) 前面から見た図

(b) 背後から見た図

図4 テスト波形の時間周波数解析結果 (3D表示)

(a) ハードスイッチング

(b) ソフトスイッチング

図5 ハーフブリッジインバータ回路

3.1 ハードスイッチングとソフトスイッチング パワーエレクトロニクス分野で様々な報告がなされている、ソフトスイッチング方式とハードスイッチング方式のスイッチング過渡時の電圧波形についての解析結果を示す。ここでは、比較的構成が簡単なハーフブリッジインバータを製作し、ハードスイッチングとソフトスイッチング(ZVS: Zero Voltage Switching)それぞれ的方式で動作させた時のスイッチング過渡時の実測波形を測定し高調波解析を行った。回路構成は、図5に示す通りである。使用したデバイスはIGBT(MG100J2YS50: 東芝)、負荷抵抗Rは6.4Ω、インダクタンスLは650μH、そしてソフトスイッ

(a) ハードスイッチング波形

(b) ソフトスイッチング (ZVS) 波形

図6 スwitching電圧波形

図7 高周波 AC リンク DC-AC コンバータ

チング (ZVS) 回路には、それを実現するためにそれぞれのデバイスに対して並列に 23nF のコンデンサ C1、C2 を接続した。それぞれの回路に対して同条件の動作を行って得られたターンオフ時のデバイスにかかる電圧波形を図 6(a),(b) に示す。各図とも実測波形、フーリエ解析結果、ウェーブレット解析結果を比較し易くするため、時間軸、周波数軸を同じスケールとした。ウェーブレット解析結果は縦軸に周波数、横軸に対象波形に対応した時間を取り、濃淡で各周波数成分の振幅強度を表している。まず、フーリエ解析結果からは、ハードスイッチングでは 5.2MHz と 10.4MHz 付近でピークが現れ、ソフトスイッチングでは、1MHz 付近でピークが現れることが確認できる。また、1MHz 付近を除き、ソフトスイッチング方式では全周波数にわたってスペクトルが低減しておりソフトスイッチングの高調波抑制効果が確認できる。これに加えて、ウェーブレット解析結果からは次のような新たな情報が得られる。ハードスイッチングの 5.2MHz と 2MHz の 2 つの周波数は、スイッチング時にの時刻で同時に生じている。この 5.2MHz は、フーリエ解析では高いピークとして現れているが、特に高いピークが存

在したのではなく、減衰時間が約 7.6μsec の 2MHz に対して 5.2MHz は約 10.8μsec までと長く、それが積分値として現れたためと考えられる。また、フーリエ解析結果からだけでは確認できなかったが、ソフトスイッチングを行ってもハードスイッチングと同様に 2MHz 付近で減衰していく同じ様な周波数帯の存在が確認された。これは外部回路的に抑制できない、すなわち IGBT 内部に起因するものではないかと推察される。そして、この 2MHz 付近の現象は IGBT の寄生容量と配線インダクタンスの共振であることが確認された。電流波形からも電圧波形と同様のことが確認されたがここでは詳細を述べることは割愛させて頂くことにする。

以上に示したように、ウェーブレット変換による時間周波数解析を用いることにより、実測波形やフーリエ解析結果だけでは解明できなかった内部回路的な現象を捉えることが可能となった。

3.2 高周波リンク DC-AC コンバータから発生する高調波の時間周波数解析 ここでは、図 7 に示す高周波 AC リンク DC-AC コンバータの出力波形 V_0 に含まれる高調波についてウェーブレット解析を行った結果を報告する。

この高周波 AC リンク DC-AC コンバータの制御は、循環電流を除去できる 2 次側位相シフト PWM 制御と称する制御方式で行っている。

図 8(a) は、高周波 AC リンク DC-AC コンバータの製作当初の出力 V_0 の実測波形及び、フーリエ解析結果、ウェーブレット解析結果である。また、このときの高調波含有率を表 3 に示す。この段階では、まだ多くの高調波を含んでいたため、まず実波形とフーリエ解析結果をもとに考察を行った。この結果、20kHz と 3kHz の高調波成分が大きくなっており、前者は高周波 AC リンク DC-AC コンバータの動作周波数であり、後者は出力電圧のゼロクロス付近で生じている歪みが原因であると推察された。そして、ゼロ付近の歪みを改善するためフィル

(a) 改良前

(b) 改良後

図 8 高周波 AC リンク DC-AC コンバータの時間周波数解析

表 2 改良後の出力波形の高調波含有率

高調波含有率	電圧 (%)	電流 (%)
総合	1.06	1.54
3 次	0.76	1.17
5 次	0.33	0.92
7 次	0.45	0.07

表 3 製作当初の出力波形の高調波含有率

高調波含有率	電圧 (%)	電流 (%)
総合	4.01	2.73
3 次	2.86	1.12
5 次	1.65	1.35
7 次	1.03	1.27

タの再設計をするなど改善策を試行錯誤的に行ったが根本的な解決を図ることはできなかった。そこで、ウェーブレット解析結果を重ねて考察を加えると、3kHz の高調波は $t = 2, 11, 18\text{msec}$ で発生していることから出力電圧のゼロクロス付近で生じている歪みが原因であると断定できた。そして、動作周波数である 20kHz を見ると出力電圧がゼロクロスする時刻である $t = 2, 11, 18\text{msec}$ の近傍で途切れていることが確認された。これは、これらの時刻において高周波 AC リンク DC-AC コンバータの動作自身が停止してしまっており出力電圧の制御が行えていなかったものと判断できる。この得られた知見をもとに、DSP を含めた制御回路を調査した結果、出力電圧のゼロクロス付近の小さな電圧を制御するのに必要な最小 PWM 信号 (約 $12\mu\text{s}$) が直接 DSP から得ることができないようになっていた。

そこで、DSP の負担を軽減させその性能をフルに発揮できるよう DSP 周辺回路の改良を行い、 $10\mu\text{s}$ の PWM 信号まで出力できるようにした。主回路はそのまま、制御回路のみを改良した高周波 AC リンク DC-AC コンバータの出力電圧波形、フーリエ解析結果、ウェーブレット

解析結果を図 8(b) に示す。また、このときの高調波含有率を表 2 に示す。これらの結果から、出力電圧のゼロクロス付近の波形の歪みは改善され、高調波含有率も大きく減少したことが確認された。また、ウェーブレット解析結果から 20kHz の成分がほぼ連続的に発生していることも確認され、これにより高周波 AC リンク DC-AC コンバータの出力電圧がゼロクロス付近でも連続して制御・動作できていると判断できる。このように、ウェーブレット解析を用いると、高調波、ノイズ発生の原因が、制御回路的な要因か主回路的な要因かを判別することができ、的確な解決法を決定できるようになると言える。

3.3 電化製品の入力波形に含まれる高調波の時間周波数解析 ここでは、電化製品を使用する際に問題となってくる入力波形に対して行った解析結果を示す。図 9 に開発段階の電化製品の入力電流波形を示す。この段階では、15 次と 17 次の周波数が高くなっており規定をクリアできていなかった。実波形とフーリエ解析結果だけでは、この 2 つの周波数が何が原因で、どこで発生しているかが判断できないため、いろいろと試行錯誤を繰り返すと理由は特定できないが結果的にはこの周波数は抑えられるという状況であった。そこで、ウェーブレット解析を行い原因究明を試みた。実波形から見ると、電流の立ち上がり時の影響が強いと思われていたが、ウェーブレット解析結果を見ると、この周波数の発生している箇所は、電流波形の中腹近辺で生じているわずかな歪みが原因であることがはっきりと認識できた。そして、この箇所について詳細な調査をした結果、負荷の変化に伴い制御系を切り替える期間であると確認できたため、その箇所の切り替えをスムーズになるように改良したところこれらの周波数が削減された。このように、高調波の発生場所を完全に特定することにより、的確な改善策が施された一例であると言える。3mm

(a) 実測波形 (スムージング)

(b) FFT 波形

図9 電化製品の入力波形に含まれる高調波

図10 電化製品への入力電流波形に含まれる高調波の時間周波数解析

4. まとめ

本論文では、高調波解析の新しい手法としてウェーブレット変換による時間周波数解析を提案し、これにより得られる解析結果がどのように現象を解明し、問題解決の一助となるかについて適用例を示しながらその成果について報告した。今回の解析結果例から得られた特徴をまとめると以下のようになる。

- スイッチング時等の過渡的現象に対する解析ができる。これにより見いだされる特徴的な高調波が、実際に用いる半導体素子内部の状態に起因するものなのか、また回路構成上の要因によるものなのかといった詳細な考察ができる。

- 時間軸情報により問題の抽出、的確な問題解決ができる。

これらは、実際のパワエレ機器設計において施される高調波フィルタなど様々な対策装置の簡略化や設計の最適

化などに有効であり、機器全体の低コスト化や小型・軽量化など周辺回路も含めた改良の手段となると期待される。また、半導体素子の特性や回路の寄生成分による影響を的確に捉えていくことにより、使用する素子の選択や変換器の実装面での改善など主回路部分の改良にも貢献することが期待できる。

また、実際に放射される電磁ノイズの測定、解析を実施すれば、電磁ノイズと電圧、電流高調波との因果関係や電磁ノイズ発生源の特定などが行える可能性が高く、電磁ノイズの様相を調べる上でも大きな効果を発揮し得るものと考えられる。

これらを今後の課題とし、さらなるウェーブレット変換による時間周波数解析の有効性や適用法について検討していく予定である。

参考文献

- (1) 赤松 他, "変換器出力高調波低減の検討における時間周波数解析の適用", 電気学会論文誌 B, Vol.121-B, No.4, pp.442-448, 2001.
- (2) 赤松 他, "電力変換装置から発生する高調波の時間周波数解析", 電気学会論文誌 D, Vol.120-D, No.7, pp.949-950, 2000.
- (3) Keiji Akamatsu, et.al., "Application of the time-frequency analysis for EMC study on power conversion system", AP-RASC'01-Tokyo, p.145, 2001.
- (4) 道平 他, "2次側位相シフト PWM 制御を行う部分共振型高周波リンク DC-AC コンバータの動作解析", 電気学会論文誌 D, Vol.117-D, No.12, pp.1503-1510, 1997.

【 討 論 】

同志社大学 井上馨

【質問1】 マザーウェーブレットと時間窓の取り方が重要だと思いますがこれらの選び方の指針はあるのでしょうか？

【回答1】 取り扱う現象や解析の目的、例えば、ノイズ除去を目的として行う場合や単にノイズの連続的な現象の解明などのように異なれば用いるマザーウェーブレットは変わってきます。どのマザーウェーブレットがどの応用に適しているかという議論は、数学の分野で検討されています。今回のような高調派の連続的な解析には、Gabor のマザーウェーブレットが適しているということなので、本研究ではこれを用いています。

【質問2】 今回3つの回路について解析されていますが、すべての回路に対して同じマザーウェーブレットを使用されているのでしょうか？回路構成によっては、マザーウェーブレットを変更する必要があるか？

【回答2】 回路が異なっても解析する目的、すなわち、高調波の連続的な周波数解析というものが同じならばマザーウェーブレットは変更する必要はありません。回路の波形により解析する周波数帯が大きく異なる場合（インバータの動作周波数レベルを解析するか、インバータの出力周波数レベルを解析するか）、周波数の解析範囲だけは変更しなければなりません。

【質問3】 回路素子の特性や、入力によっては非線形現象が生じる回路が存在しますが、このような回路の解析は可能でしょうか？

【回答3】 ウェーブレット解析では、現象の生起時間の特定や不連続点の検出も可能になりますので、非線形現象についても解析は可能と考えています。

大阪工業大学 木村紀之

【質問1】 ウェーブレット変換をするのにどのようなソフトウェアを使用しているのか？時間はどの程度かかるのか？

【回答1】 ソフトウェアは、C言語で自作したものを使用しています。解析時間は、サンプリング周波数25MHz、データ1000サンプルをPentium550MHzで解析すると約1分程度となります。