実効値・電力測定への離散ウェーブレットパケット変換の適用

学生員 横山 信明 (大阪大学)

非会員 Effrina Yanti Hamid (大阪大学)

正員 河崎 善一郎 (大阪大学)

Wavelet Packet Transform for RMS and Power Measurements

Nobuaki Yokoyama, Student Member, Effrina Yanti Hamid, Non-member, Zen-Ichiro Kawasaki, Member (Osaka University)

This paper proposes an approach based on wavelet packet transform (WPT) for root mean square (rms) and power measurements. The WPT can decompose a waveform into uniform frequency bands, which are important for identification of harmonic components and measurement of harmonic parameters.

キーワード：電力、実効値、高調波、ウェーブレット、ウェーブレットパケット

1. はじめに

現在、電力品質が大きな問題になっている。電力系統の重要な課題の一つに高調波に起因する定常波形の歪みを挙げることが出来る。高調波は機器の性能を低下させ得る為、電圧、電流、電力の値を絶えず観測することが重要となる。

実効値及び電力の測定に対し離散ウェーブレット変換(以下 DWT)を適用させることはあまり試みられておらず、文献(2)において最初に提案され、DWTにより各周波数帯域毎での高調波の実効値・電力対の測定が可能になることが結論づけられている。しかし、DWTを用いた波形分解においては周波数が高くなるにつれ周波数帯域が広がる欠点が存在する。これに対処する為、離散ウェーブレットパケット変換(以下 WPT)への拡張を試みる。WPTは固定周波数帯の波形分解を可能にする特徴を持つ為、固有の高調波成分の実効値及び出力を測定することが期待される。

2. 離散ウェーブレットパケット変換

WPTの詳細については文献(3)に挙げられているので、ここでは概略のみ示す。WPTはピラミッド型(あるいはDWT)の木を直接完全二者択一式の木にまで分解する。WPTによる分解は図1に示されている。もとの波形を 2^N 箇所の点でサンプリングするとしよう。レベル j, k 次のサンプリング点および節番号 i の節におけるウェーブレット係数を $d_{j,k}^i$ とする。但し $i=0, 2, \dots, 2^{N-j}-2$ (偶数)および $j=1, 2, \dots, N$ とする。この係数は導出結果 $d_{j+1,k}^{i/2}$ をローパスフィルタ(以下 LPF) h_{-k} にかけた後、2のファクターでダウンサンプリングすることで得られる。同様に、節 $i=1, 3, \dots, 2^{N-j}-1$ (奇数)におけるウェーブレット係数は導出結果 $d_{j+1,k}^{(i-1)/2}$ をハイパスフィルタ(以下 HPF) g_{-k} にかけた後、2のファクターでダウンサンプリングするこ

図1 WPTによる分解

Fig.1 Wavelet packet decomposition

とで得られる。 h_{-k} と g_{-k} の対は対応するミラーフィルタの対である。すなわち両方のフィルタは同じ係数のセットを用いる。しかし、可変信号は逆のオーダーを持つ。WPTには様々な種類のフィルタが用いられるが、本研究においては、高い周波数選択性をもつ Vaidyanathan フィルタを用いた。このフィルタの係数は文献(3)に示されている。

3. 実効値及び電力の測定

測定対象は I_{rms}, V_{rms}, P であり、次式で表わされる。

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_t^2 dt} \cong \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i_n^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^i)^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} (I_j^i)^2} \quad (1)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_t^2 dt} \cong \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} v_n^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^i)^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} (V_j^i)^2} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i_t v_t dt \cong \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} i_n v_n$$
$$= \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k}^i d_{j,k}^{*i} = \sum_{i=0}^{2^{N-j}-1} P_j^i \dots (3)$$

図2 レベル2におけるウェーブレット係数
Fig.2 Wavelet coefficients at level 2
但し、図2においては、見易くする為に節番号 (NODES NUMBER)1~8の電流・電圧は節番号0の電流・電圧の5倍、節番号1~8の電力は節番号0の電力の50倍としてある。

但し、 i_t 及び v_t は、それぞれ電流・電圧の瞬時値であり、 i_n 及び v_n は i_t 及び v_t をデジタル化したものであるとする。但し $i = 0, 1, \dots, 2^N - 1$ (N は整数) である。また、 $d_{j,k}^i$ 及び $d_{j,k}^{*i}$ はそれぞれ i_n 及び v_n のウェーブレット係数であり、 I_j^i 及び V_j^i はそれぞれレベル j で節番号が i の点における電流及び電圧値の実効値である。また、 P_j^i は節番号 i レベル j に於ける周波数帯域の電力である。

4. シミュレーション

WPTによる電力測定の実行テストとして、以下のように式によって模擬した電流、電圧波形に対して分析を試みた。それぞれの波形は60Hzの基本波形一周あたり128($N=7$ の場合)のサンプリング点をもち、1、3、5、7、9、11次(奇数)の高調波をもつものとする。

$$i(t) = \sqrt{2} \times \{1.0 \sin(2\pi 60t + 10^\circ) + 0.1 \sin(2\pi 180t + 150^\circ) + 0.08 \sin(2\pi 300t + 135^\circ) + 0.08 \sin(2\pi 420t + 170^\circ) + 0.09 \sin(2\pi 540t + 10^\circ) + 0.07 \sin(2\pi 660t + 50^\circ) + 0.08 \sin(2\pi 780t + 120^\circ)\}$$

$$v(t) = \sqrt{2} \times \{1.0 \sin(2\pi 60t) + 0.2 \sin(2\pi 180t + 135^\circ) + 0.2 \sin(2\pi 300t + 150^\circ) + 0.1 \sin(2\pi 420t + 140^\circ) + 0.08 \sin(2\pi 540t + 40^\circ) + 0.1 \sin(2\pi 660t + 20^\circ) + 0.1 \sin(2\pi 780t + 150^\circ)\}$$

まず、電流、電圧値をMATLAB及びWavelab v.802を用い、第2章で述べたアルゴリズムに沿って分解した。レベル2に於いて各周波数帯は全て高調波成分を1つずつ含んでいることから、実効値及び電力の測定に際してレベル2におけるウェーブレット係数に注目した。図2は選択された節の電流、電圧、及び電力のウェーブレット係数を示している。それぞれの節は4つの係数をもつ。節における

表1 DWT、WPTによる実効値・電力の計算
Table.1 Comparison results among true, DWT, and WPT values

但し、1920Hz、1080Hz以上の周波数帯における値は0に近い為省略した。

周波数帯 (Hz)	実際の値			DWT から導出した値		
	I_{rms}	V_{rms}	Power	I_{rms}	V_{rms}	Power
DC ~ 120	1.0000	1.0000	0.9848	1.0000	1.0000	0.9848
120 ~ 240	0.1000	0.2000	0.0193	0.1000	0.2003	0.0193
240 ~ 480	0.1131	0.2236	0.0224	0.1155	0.2232	0.0222
480 ~ 960	0.1393	0.1625	0.0191	0.1365	0.1616	0.0191
960 ~ 1920	0.0000	0.0000	0.0000	0.0139	0.0179	0.0000
TOTAL	1.0209	1.0566	1.0457	1.0209	1.0566	1.0457

周波数帯 (Hz)	実際の値			WPT から導出した値		
	I_{rms}	V_{rms}	Power	I_{rms}	V_{rms}	Power
DC ~ 120	1.0000	1.0000	0.9848	1.0000	1.0000	0.9848
120 ~ 240	0.1000	0.2000	0.0193	0.1000	0.2003	0.0193
240 ~ 360	0.0800	0.2000	0.0155	0.0798	0.1994	0.0154
360 ~ 480	0.0800	0.1000	0.0069	0.0835	0.1002	0.0068
480 ~ 600	0.0900	0.0800	0.0062	0.0866	0.0796	0.0063
600 ~ 720	0.0700	0.1000	0.0060	0.0690	0.0988	0.0059
720 ~ 840	0.0800	0.1000	0.0069	0.0799	0.1001	0.0069
840 ~ 960	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000
960 ~ 1080	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TOTAL	1.0209	1.0566	1.0457	1.0209	1.0566	1.0457

ウェーブレット係数は全て実効値、電力を計算する為にそれぞれ式(1)(2)に適用される。

表1には実効値及び電力の実際の値(計算により導出)とDWT、WPTにより導出された値との比較結果を示す。この表からDWTの場合は複数の周波数成分を含んでしまうのに対して、WPTではそのようなことは起こらず各高調波成分毎に対しての実効値及び電力の測定が可能になること及びその測定が正確であることが示される。

5. まとめ

WPTを用いた手法は、DWTを用いた実効値及び電力の測定手法をより拡張させることが期待できる。このアルゴリズムにより各高調波成分を分解し、実効値及び電力を測定することが可能である。式によって模擬した電流電圧波形に対してWPTを適用させた結果、実効値及び電力の合計値は式から直接算出した場合と同じであった。しかしながら幾つかの節において実効値及び電力に対し僅かな誤差が生じた。これらの誤差はロールオフ特性におけるLPF及びHPFの対に存在する誤差に由来すると考えられる。

(平成13年4月10日受付, 同13年6月22日再受付)

文 献

(1) V. L. Pham and K. P. Wong, "Wavelet transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 146, pp. 249-255, 1999.
(2) W. K. Yoon and M. J. Devaney, "Power Measurement Using the Wavelet Transform", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 47, pp. 1205-1210, 1998.
(3) M.V. Wickerhauser, "Adapted wavelet analysis from theory to software", IEEE Press, New York, USA, 1994, pp. 237-272 and pp. 443-462.