A Wavelet-based Fast Discrimination of Transformer Magnetizing Inrush Current

Masashi Kitayama Member (Mitsubishi Electric Corporation, Kitayama.Masashi@wrc.melco.co.jp)

Keywords: distribution system, transformer, inrush current, protective relay, fast fault detection, discrete wavelet transform, statistical modeling

Recently customers who have sensitive industrial loads have been installing co-generation facilities. They can avoid voltage sags and other distribution system related disturbances by supplying electricity to important load from their generators. For another example, FRIENDS, highly reliable distribution system using semiconductor switches or storage devices based on power electronics technology, is proposed. These examples illustrate that the need for high reliability in distribution system is increasing. In order to realize these systems, fast relaying algorithms are indispensable. The authors propose the necessity of protection devices that have the ability of processing fast relaying algorithms for distribution system.

In designing fast protection systems, fast discrimination of magnetizing inrush current is also indispensable. Conventional method of inrush current detection for transformer protection utilizes the amount of second harmonic component of differential current. The author proposes a new method of detecting magnetizing inrush current using discrete wavelet transform.

Fig. 1 shows the results of wavelet of inrush current. The upper figure shows a waveform of inrush current and the three figures below indicate wavelet components of level 1, 2 and 3. Wavelet

transform provides the function of detecting discontinuity of current waveform. according to state transition between non-saturation and saturation of transformer core. The proposed method detects spikes of the wavelet component of level 3 derived from the discontinuity of the current waveform at both the beginning and the end of inrush current. In spike detection algorithm, wavelet thresholding, one of the wavelet-based statistical modeling, was applied to estimate detection function of inrush current. Parameters of detection function, such as standard variation of the wavelet component was determined considering a distribution of wavelet component.

The proposed method is verified using experimental data using single-phase transformer. The result of the spike detection using a moving window is shown in Fig. 2. In this figure, the result of spike detection is plotted together with original current waveform of each inrush and short-circuit fault. In the proposed method, inrush current is discriminated when the 2nd spike of wavelet component or level 3 disappeared. In this case, inrush current can be discriminated at 11.6 ms after inrush current began to flow. This simulation shows that the proposed method can detect inrush current in less than 1 cycle and was proved to be effective.

Fig. 1. Wavelet components of inrush current and short-circuit fault current

Fig. 2. Results of inrush current discrimination by spike detection

ウェーブレット変換を用いた励磁突入電流の高速判別手法

正 員 北山 匡史*

A Wavelet-based Fast Discrimination of Transformer Magnetizing Inrush Current

Masashi Kitayama*, Member

Recently customers who need electricity of higher quality have been installing co-generation facilities. They can avoid voltage sags and other distribution system related disturbances by supplying electricity to important load from their generators. For another example, FRIENDS, highly reliable distribution system using semiconductor switches or storage devices based on power electronics technology, is proposed. These examples illustrates that the request for high reliability in distribution system is increasing. In order to realize these systems, fast relaying algorithms are indispensable.

The author proposes a new method of detecting magnetizing inrush current using discrete wavelet transform (DWT). DWT provides the function of detecting discontinuity of current waveform. Inrush current occurs when transformer core becomes saturated. The proposed method detects spikes of DWT components derived from the discontinuity of the current waveform at both the beginning and the end of inrush current. Wavelet thresholding, one of the wavelet-based statistical modeling, was applied to detect the DWT component spikes.

The proposed method is verified using experimental data using single-phase transformer and the proposed method is proved to be effective.

キーワード：配電系統，変圧器，励磁突入電流，保護リレー，高速故障判別，離散ウェーブレット変換

Keywords: distribution system, transformer, inrush current, protective relay, fast fault detection, discrete wavelet transform

1. はじめに

半導体工場などのように非常に高品質な電力を必要とするケースでは，系統電源のバックアップ電源として，瞬低対策用高速解列システムを導入した自家発電設備の利用が将来拡大されると想定される⁽¹⁾。また，高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム（FRIENDS；Flexible, Reliable and Intelligent Electric eNergy Delivery System）⁽²⁾でも高速な故障検出および故障箇所の除去が必要であり，半導体スイッチを用いた高速切り替え方式が検討されている⁽³⁾。

このように，配電系統ではいろいろな観点から電力供給の高信頼化に対する要求が出てきている。故障時の瞬時電圧低下の継続時間を短縮するためには，高速に故障を検出する必要がある。需要家構内系統で用いられている過電流検出要素は，電流の大きさのみによって故障かどうかを判別する比較的単純な検出方式であり，励磁突入電流による誤動作の可能性がある。このため，高速故障検出のために

は励磁突入電流についても高速に判別する必要がある。

変圧器主保護リレーでは，変圧器起動時に流れる励磁突入電流による誤動作を防止するために，電流波形の第2次高調波成分含有率が一定値以上の場合に励磁突入電流と判別する手法が用いられている。この手法では，過渡的な電流波形の第2次高調波成分を求めるまでの時間が必要であり，1サイクル以内の短時間で判別するのは困難である。そこで，著者は1サイクル以内の短時間で励磁突入電流を判別するために，変圧器鉄心の磁化特性を利用した判別手法を提案した⁽⁴⁾。この手法では，4～5 msの半サイクル以内で励磁突入電流を判定することが可能であるが，電圧波形と電流波形の両方を用いるため変圧器にVTとCTを設置する必要があり，コスト面における問題点がある。そこで，著者は電圧波形を用いずに電流波形のみを用い，ウェーブレット変換を用いて励磁突入電流を判別する手法について検討を行っている⁽⁵⁾。

励磁突入電流を判別する手法については，従来の第2調波成分レベルによる判別手法に替わる手法として変圧器の等価回路に着目した手法⁽⁶⁾，変圧器内部に流入する有効電力に着目した手法⁽⁷⁾，変圧器鉄心の磁化特性に着目した手法⁽⁸⁾，ニューラルネットを用いる手法⁽⁹⁾，励磁突入電流の電流波

* 三菱電機（株）先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

形の形状に着目して形状そのものの特徴によって判定する手法が提案されている⁽¹⁰⁾。励磁突入電流や故障発生時の短絡電流は過渡現象であり、過渡的な周波数成分の時間変化をとらえることのできる離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transform ; DWT) の適用が考えられる。DWT については、近年電力分野でも、電力品質の分類⁽¹¹⁾、送電線の故障点標定⁽¹²⁾ など、さまざまな適用が試みられており、保護リレーへの適用についても、送電線保護リレーへの適用手法^{(13)~(16)} や変圧器保護への適用手法^{(17)~(21)} が提案されている。励磁突入電流の判別方式として、ウェーブレット係数のエネルギーの相関を用いた判別関数を用いる手法⁽¹⁷⁾ では、電流波形を数サイクル程度のデータについての検討であるため、判別に用いるデータのウィンドウが時間につれて移動するオンラインでの判別には適用することはできない。また、ウェーブレット変換の結果を入力とするニューラルネットによって励磁突入電流を判別する手法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ では、あるウィンドウでのデータを用いた判別手法について検討しているが、ニューラルネットの特性として判別の根拠が明示的に示されないため、実用上は判別ロジックを明確に記述できる手法の方が望ましい。

また、励磁突入電流と系統における故障との判別手法⁽²⁰⁾ では、各相の相電流のウェーブレット変換結果が示されているものの、判別手法としては電流波形のピーク値の時間間隔を用いたものであり、ウェーブレット変換結果の利用についてはふれられていない。励磁突入電流と変圧器内部故障電流についての離散ウェーブレット変換による解析⁽²¹⁾ では、本研究と同様に高周波でのウェーブレット成分にスパイクが見られることを述べているが、具体的な判別手法まで言及されていない。

本研究では、配電系統における高速保護方式への適用を念頭に置き、励磁突入電流のオンラインでの判別に用いることを目的として、判別の高速性に主眼をおいて検討を行った。

2. 配電系統での高速保護リレーの必要性⁽⁴⁾

自家発の高速解列システムでは、通常時は常用発電機を系統に連系しているが、瞬低発生時は高速遮断器を開放し商用系統から発電機系統を分離して発電機単独運転とし、発電機より負荷に電力供給する。図 1 のように、負荷を重要負荷と一般負荷に区別して、受電母線に高速連系遮断器を設置し、重要負荷側にコージェネレーションなどの自家発常用発電設備を設置して受電母線の発電設備側に配置する。商用系統側の故障時に受電母線での電流値、電圧値を用いて故障を判別し、高速真空遮断器によって系統から自家発設備を解列することによって重要負荷を守ることができる⁽¹⁾⁽²²⁾。

自家発の高速解列を行うためには、受電母線における高速な故障判別技術が必要である。故障判別の要素として、不足電圧要素と過電流要素があげられる。瞬低自体については不足電圧要素で検出可能であるが、商用系統側での短絡故障で、自家発からの過大な短絡電流によって発電機の

図 1 系統連系点での高速遮断

Fig. 1. Fast breaker installed in connecton point.

シェアピン折損が生じるケースがあり、このようなケースでは過電流保要素が必要になる。受電母線での過電流を抑制するために、連系点に設置する限流装置も開発されている⁽²³⁾。

このような観点から、本研究では過電流要素の誤動作の要因として、変圧器の起動時の突入電流について検討を行った。変圧器の励磁突入電流による誤動作防止機能は、通常は変圧器主保護リレーに固有の機能であるが、上記のケースのように、配電系統での高速保護方式を考える場合には、変圧器主保護以外の保護リレーにも必要になる場合が出てくると考えられる。

次に、電流値のサンプリング周波数を選定するため、想定するハードウェアについて以下に述べる。現行のデジタルリレーでは、サンプリング周期は 600/720 Hz (電気角 30 度) あるいは第 2 世代デジタルリレーではその 8 倍 (電気角 3.75 度) が一般的である⁽²⁴⁾。しかし、DSP のように信号処理能力に優れたハードウェアを用いれば、判別の高速化を実現することが可能であると考えられる。

3. DWT による励磁突入電流の特徴抽出

〈3・1〉ウェーブレット変換適用の考え方 本研究では、周波数成分の時間変化をとらえることのできる離散ウェーブレット変換を用いた判別手法について検討を行った。ウェーブレット変換とは、局在化する波の拡大縮小・平行移動した直行関数系による時間周波数解析手法である⁽²⁵⁾。ウェーブレットとは時間軸の上で短い時間のみ持続する関数の総称である。フーリエ変換は正弦波を核関数とするのに対し、ウェーブレット変換では時間的に局在した関数を積分変換の核関数とすることによって時間分解能を持たせることができる。ウェーブレット変換での核関数をアナライジングウェーブレットと呼び、 $\psi(t)$ と記述することにする。時間的に局在するということは、数学的には以下のような条件で記述される。この条件は、直観的には平均が 0 となることを意味する。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \dots\dots\dots (1)$$

周波数の時間的変化を考慮するためには、周波数を表すパラメータの他に時間軸上を平行移動させるパラメータが必要である。これを考慮し、ウェーブレットを以下のように定義する。

$$\psi^{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0) \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式で、 a は周期を表すパラメータ、 b は平行移動を表すパラメータである。

解析対象の時系列データを $f(t)$ とする。関数 $f(t)$ のウェーブレット変換 $T(a, b)$ は、(2) 式の関数系を基底として以下のように定義される。

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^{(a,b)*}(t) f(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 C_ψ は正規化のための定数、 $*$ は複素共役である。また、逆変換は以下のように定義される。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{C_\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(a, b) \psi^{(a,b)}(t) \frac{1}{a^2} da db \dots\dots\dots (4)$$

離散ウェーブレット変換では、パラメータ a, b をそれぞれ $2^{-j}, 2^{-j}k$ (j, k は整数) というように 2 のべき乗を単位として離散化する。

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \dots\dots\dots (5)$$

離散ウェーブレット変換を $T(2^{-j}, 2^{-j}k) \equiv d_k^{(j)}$ と書くことにする。離散ウェーブレット変換、逆変換は次のようになる。

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(2^j t - k) f(t) dt \dots\dots\dots (6)$$

$$f(t) = \sum_j \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j t - k) \dots\dots\dots (7)$$

(7) 式で、 k に関する和の部分

$$g_j(t) = \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j t - k) \dots\dots\dots (8)$$

とおく。関数 $f(t)$ を離散化した時系列データをレベル 0 の関数 f_0 によって表されると仮定すると、(7) 式は

$$f_0(t) = \sum_{j=1}^J g_j(t) + f_J(t) \dots\dots\dots (9)$$

と表せる。この整数 j をレベルと呼んでいる。整数 j は周波数を表すパラメータであり、(9) 式はもとの関数 $f(t)$ を徐々にウェーブレット成分に分解する様子を示している。 j は 2 のべき乗で表される周波数であるので、 j が 1 小さくなると、解像度が半分になる。このような解像度の階層構造を多重解像度解析と呼ぶ。多重解像度解析によって各レベルにおけるウェーブレット成分を求めることができる。すなわち、多重解像度解析とは、ウェーブレット係数である (6) 式の $d_k^{(j)}$ を求めることに相当する。(6) 式の $d_k^{(j)}$ は、分解アルゴリズムを用いて容易に求めることができる。

図 2 Daubechies D6 のウェーブレット関数

Fig. 2. Daubechies D6 wavelet function.

ウェーブレットとして、現在までにいろいろな関数が提案されている。ドベシウェーブレットは直交基底を作るサポートコンパクトなウェーブレットとして I. Daubechies によって作られた関数である。この関数は、自然数 N で特徴づけられた一連のウェーブレット関数群であり、0 次から $N-1$ 次まですべてのモーメントが 0 となる。6 次のドベシウェーブレット関数を図 2 に示す。

ウェーブレットの工学的応用の利点として、信号に含まれる波形の不連続の位置とおおまかな大きさの検出、ウェーブレット解析に用いる関数と似たような波形の信号からの検出、波形の周波数成分に対するさまざまなフィルタリング操作の 3 点が挙げられる⁽²⁵⁾。

励磁突入現象は、変圧器鉄心が非飽和状態から飽和状態へ移行することによって生じる現象であり、非飽和状態から飽和状態、あるいは飽和状態から非飽和状態の状態の遷移による不連続性を検出することができれば励磁突入を判別することができると考えられる。一方、短絡故障の場合には、故障発生時には系統の状態変化に変化が生じて不連続性が生じるが、故障が除去されたり故障点のインピーダンスが変化しない限り状態は変化しない。短絡故障時の電流波形は、故障発生時の境界条件によって決まる直流減衰成分が正弦波に重畳した波形であり、波形の不連続点は存在しない。したがって、励磁突入電流発生時・短絡故障発生時の不連続点以降の不連続点の有無によって、励磁突入電流の判別が可能であると考えられる。

〈3・2〉 実験データを用いた数値例 前節の考え方の妥当性を検討するため、実機の単相変圧器を用いて 1 次側の電流波形を実測を行い、実測した電流波形データを用いて MATLAB による数値シミュレーションを行った。実験に用いた単相変圧器の仕様を表 1 に示す。

励磁突入と短絡故障を模擬するため、それぞれ変圧器の 2 次側を開放、低抵抗 (抵抗値: 0.26 [Ω]) で短絡して実験を行った。いずれのケースについても、上記の条件で変圧器の 1 次側のしゃ断器を投入して変圧器に電圧を印加した。励磁突入および短絡故障の発生タイミングのばらつきを考慮するため、しゃ断器の投入位相を 1 ms 単位で変化させて実験を行った。ただし、投入タイミングには実験に用いた制御装置の性能上、0.5 ms 程度の誤差が生じる。励磁突入の場合 10 ケース、短絡故障の場合 8 ケースについて実験を行った。

電流波形データのサンプリング周波数は 10 kHz、サンプル数は 512 とした。これは、現行の保護リレー装置でのサンプリング周波数と比較すると若干高い値ではあるが、技術的には十分実現可能な値である。

励磁突入電流および短絡故障電流の波形を図 3 に示す。図 3(a) が励磁突入電流、(b) が短絡故障電流である。励磁突入電流波形は変圧器の鉄心が飽和状態になってリアクタンスが非常に小さくなったときにのみ流れるため、半波整流回路のような電流波形となる。一方、短絡故障時は上記のように基本的には正弦波である。

図 3 の電流波形に対して離散ウェーブレット変換を行った。マザーウェーブレットとして、図 2 で示した 6 次のドベシウェーブレットを選択した。この理由は後述する。励磁突入電流の場合と短絡電流の場合の結果を図 4 に示す。もとの電流波形をレベル 0 とし、レベル 1 からレベル 3 までのウェーブレット成分を示している。レベルは周波数に対応しており、レベルが 1 大きくなると周波数が 1/2 になり、もとの電流波形から徐々に荒い周波数成分が抽出される。サンプリング周波数を 10 kHz とした場合、ウェーブレット成分の周波数は表 2 のようになる。

図から分かるように、レベル 1, 2 では励磁突入電流、短絡故障電流ともあまり大きな違いは見られない。レベル 3 の周波数成分を表すウェーブレット係数では、励磁突入電流お

よび短絡故障電流が流れ始めるときにウェーブレット成分の値がある時刻において非常に大きな値となっている。レベル 3 の周波数は 1 kHz であるため、ウェーブレット成分が大きな値になるのは 1 ms 程度である。このようなウェーブレット成分の形状を、以下ではスパイクと呼ぶことにする。後述のように、スパイクを定量的に判定することによって励磁突入電流を判別することができる。

N 次のドベシウェーブレットは、 $N - 1$ 次までのモーメントが 0 となり、 N が大きくなるほど滑らかになるが、不連続性の検出精度は高くなる。一方で、 N 次のコンパクト

表 1 実験に用いた変圧器仕様

Table 1. Specification of the transformer.

Rated Voltage	3300 [V]/100 [V]
Rated Capacity	1200 [kVA]
Connection	Y-Δ
% Reactance	3.20 [%]
% Impedance	3.25 [%]

(a) Waveform of inrush current

(b) Waveform of short-circuit current

図 3 励磁突入時および短絡故障時の電流波形例

Fig. 3. Measured waveform of inrush current and short-circuit current.

(a) Wavelet components of inrush current

(b) Wavelet components of short-circuit fault current

図 4 励磁突入電流と短絡故障電流のウェーブレット成分の例

Fig. 4. Wavelet components of inrush current and short-circuit fault current.

表 2 各ウェーブレット成分の周波数

Table 2. Frequency of Wavelet Components.

Level	Frequency
1	2.5 kHz ~ 5 kHz
2	1.25 kHz ~ 2.5 kHz
3	0.635 kHz ~ 1.25 kHz

ト台は $[-N+1, N]$ で与えられ、次数が高くなるほどコンパクト台の大きさが大きくなって時間分解能が落ちる。マザーウェーブレットとして、 $N=2, 4, 6, 8, 10$ 次のドベシウェーブレットについてウェーブレット変換を行ってスパイクの大きさを求めたところ、6 次のマザーウェーブレットの場合がもっとも大きな値になったため、マザーウェーブレットの次数を 6 次とした。

励磁突入電流の場合は、電流が流れなくなるときおよび再度流れ始めるときにウェーブレット成分のスパイクが見られる。励磁突入電流は通常数秒のオーダの時定数で減少して何度も電流が流れるため、そのたびのウェーブレット係数のスパイクが観測される。一方、短絡故障の場合には、電流波形は故障発生位相によっては直流減衰分は含むが基本的には正弦波となるため、故障電流が流れている間はウェーブレット成分は小さい値をとり、故障電流が流れ始めるとき、および電流が遮断されたときにそれぞれスパイクが観測される。

励磁突入と短絡故障の場合それぞれについて、スパイクのピーク値をプロットした結果を図 5 に示す。励磁突入の場合は、最初に励磁突入電流が流れてから 4 つのスパイクについて、短絡故障の場合は、短絡故障電流が流れ始めるときと電流がしゃ断されるときに 2 つのスパイクについてプロットしている。

図 5 から分かるように、励磁突入の場合には、スパイクのピーク値は投入位相によらずおおよそ 25~55 の範囲になっている。これに対して、短絡故障の場合には投入位相によっておおよそ 10~120 と励磁突入の場合よりも広い範囲に分散している。したがって、ウェーブレット成分の値そのものでは励磁突入と短絡故障を判別できないことが分かる。励磁突入を判別するためには、ウェーブレット成分の大きさではなく、スパイクの発生回数を数える必要がある。

提案手法では、レベル 3 のウェーブレット成分に見られるスパイクの数および発生時間間隔に着目して励磁突入電流の判別を行う。

変圧器を投入してからもっとも早く励磁突入電流が流れるのは、残留磁束密度が最大磁束密度になっていて、電圧位相が 0 のときに投入した場合である。磁束密度は電圧の積分値で増加するため、この場合電流が流れて 1/2 サイ

ルで再び非飽和状態となる。したがって、励磁突入電流がもっとも長く流れるのは 1/2 サイクルとなる。一方、短絡故障では、故障発生時と故障電流しゃ断時にスパイクが見られることを考えると、スパイクの時間間隔はしゃ断器の性能を考慮すると数サイクル程度と考えられる。このことから、レベル 3 のウェーブレット係数のスパイクを検出してスパイク数をカウントし、1 回目と 2 回目のスパイクの時間間隔が、1 サイクル以下であれば、励磁突入電流と判別することが可能であると考えられる。

〈3・3〉 ウェーブレット成分のスパイク検出方式 レベル 3 のウェーブレット成分のスパイクを検出するため、thresholding の考え方をを用いる。thresholding は、細かい変化をあるしきい値をパラメータとする関数によって除去するもので、信号処理におけるノイズ除去に用いられる手法である⁽²⁶⁾。

thresholding の基本的な方法には、hard thresholding と soft thresholding の 2 種類があり、それぞれの thresholding 関数 $T^h(x)$ と $T^s(x)$ はそれぞれ下記で与えられる。

$$T^h(x) = xI_{\{|x|>\lambda\}} \dots\dots\dots (10)$$

$$T^s(x) = \text{sgn}(x)(|x| - \lambda)I_{\{|x|>\lambda\}} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 I_A は条件 A が真のとき 1、偽のとき 0 をとる関数、 $\text{sgn}(x)$ は x が正のとき 1、負のとき -1、0 のとき 0 となる関数である。 λ はどの程度の細かさの変動を除去するかを決定するしきい値である。本研究では、もっとも単純な hard thresholding を用いた。

しきい値の与え方はいろいろな手法があるが、その一つとして (12) 式で与えられる universal thresholding があげられる⁽²⁶⁾。

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log N} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 σ はウェーブレット成分の標準偏差、 N はデータサンプル数を示す。本研究における thresholding の目的はノイズの除去ではなくスパイクの検出であるため、この thresholding 関数を判別関数と見なし、ある時刻におけるウェーブレット成分の thresholding 結果が 0 であればスパイクではなく、正であればスパイクが存在すると判別できるようにしきい値を設定すればよい。

λ の設定について検討するため、レベル 3 のウェーブレット成分の分布について検討を行った。励磁突入電流と短絡故障電流でのレベル 3 のウェーブレット成分のヒストグラムを図 6 に示す。また、レベル 3 のウェーブレット成分の統計量を表 3 に示す。3 次モーメントの歪度 (Skewness) は分布の左右対称性を表し、この値が正であれば分布が右に偏っていることを示す。また、4 次モーメントの尖度 (Kurtosis) は平均の回りに集中している度合いを表し、この値が 3 に近いほど正規分布と似た分布である。標準偏差は励磁突入電流の場合にはおおよそ 7~9、短絡故障電流の場合には 8~12 となっている。ここでは、thresholding における σ は 10 と設定した。

図 5 ウェーブレット成分のスパイク最大値

Fig. 5. Wavelet components of inrush current and short-circuit fault current.

(a) Wavelet components of inrush current

(b) Wavelet components of short-circuit fault current

図6 レベル3のウェーブレット成分の分布の例

Fig. 6. Distribution of wavelet component (level 3).

表3 レベル3のウェーブレット成分の統計量

Table 3. Statistics of DWT component (level 3).

	Inrush	Short-circuit
Standard deviation	7.06–8.95	7.90–12.25
Skewness	7.35–11.37	42.12–3.3170
Kurtosis	10.6729	59.2593

(a) Inrush

(b) Short-circuit fault

図7 ウェーブレット成分の標準偏差に対する比率

Fig. 7. Ratio of wavelet components to standard deviation.

各ケースにおける標準偏差の値に対するスパイクの大きさを検討するため、図5で示したスパイクの大きさを標準偏差の値で正規化した相対値を図7に示す。図7から分かるように、励磁突入の場合には、スパイクの値はおおよそ標準偏差の3～6倍であり、短絡故障の場合には投入位相によっておおよそ2～12倍になっている。ここでは **thresholding** 関数のしきい値標準偏差の2倍とし、 $\lambda = 2$ と設定した。

求めたしきい値を用いて **hard thresholding** を行った結果を図8に示す。図8に示したように、もとのウェーブレット成分のスパイクよりも明確にスパイクが検出されていることが分かる。

スパイクが検出できるかどうかは、ある1時刻だけでなく、スパイクが含まれるウィンドウで処理を行う必要がある。ウィンドウの設定はオンラインでの判別手法に関連するため次章で述べる。

(a) Waveform of inrush current

(b) Waveform of short-circuit fault current

図8 ウェーブレット成分の **thresholding** 結果

Fig. 8. Results of thresholding of wavelet component.

4. オンラインでの判別方式

これまでの検討では、全サンプルデータについてのウェーブレット成分を対象としており、オフラインでしか適用できない。オンラインで判別する場合には、判別に用いるデータ長のウィンドウが時刻の経過とともに移動するため、ウィンドウ長のサンプリングデータしか用いることができない。本研究では、オンラインでの判別方式として、移動ウィンドウによるウィンドウ長のサンプルデータを用いた方式について検討を行った。時刻 t における電流値を i_t と表すと、ウィンドウ長を L とすると判別に用いるデータは $\{i_k | t - L + 1 \leq k \leq t\}$ となる。

データのサンプル数を限定した場合、ウィンドウの端の周波数成分の影響を考慮する必要がある。ウィンドウ長は64サンプルとして、図3に示した電流波形について、時刻12 msから64サンプルの6.4 msのデータに対するウェーブレット変換結果を図9に示す。図9に示したように、ウィンドウの端の18.4 msの時刻でウェーブレット成分に大きなスパイクが見られる。図4で検出されるスパイクの大きさが50程度であるのに対し、図9でのスパイクの大きさはその10倍程度になっているため、本来検出すべきスパイクの判別に大きな影響を与える。この影響を除くため、以下のように処理を行う。

[Step 1] スパイク数を0にセットする。スパイクがあることを表すフラグ (以降スパイクフラグ) をリセットする。

[Step 2] 時刻 t について、ウィンドウ長のサンプリングデータ $\{i_k | t - L + 1 \leq k \leq t\}$ を用いてレベル3のウェーブレット成分 $\{w_k^{(3)} | t - L + 1 \leq k \leq t\}$ を求める。

[Step 3] 求めたウェーブレット成分の前半半分の $\{w_k^{(3)} | t - L + 1 \leq k \leq t - L/2 + 1\}$ についてスパイク検出処理を行う。スパイク検出処理の詳細については後述する。1サンプル時刻前での処理で設定されたスパイクフラ

図9 ウィンドウデータによるウェーブレット成分
Fig. 9. DWT Component using window data.

グの値によって以下の処理を行う。

- スパイクが検出された場合、1 サンプル時刻前でスパイクフラグがリセットされていたら、時刻 t でスパイクが発生したことを表すため、スパイクフラグをセットする。
- スパイクが検出された場合、1 サンプル時刻前でスパイクフラグがセットされていたら、時刻 t でもスパイクが発生していることを表すため、スパイクフラグはセットされたままとする。
- スパイクが検出されなかった場合、1 サンプル時刻前でスパイクフラグがリセットされていたらスパイクフラグをリセットされたままにする。
- スパイクが検出されなかった場合、1 サンプル時刻前でスパイクフラグがセットされていたら、時刻 t でスパイクがなくなったことを表すため、スパイクフラグをリセットし、スパイク数を1増やす。

[Step 4] スパイク数が2になったら励磁突入電流と判断して、処理を終了する。

[Step 5] 時刻が1 サンプル時間進んで $t+1$ になったらウィンドウを移動させて時刻を更新し、Step 2に戻る。

スパイク検出に用いるデータ長が $L/2$ であるため、ウィンドウの移動量は実際にはデータ長 $L/2$ 、あるいはデータが半分入れ替わるようにすると $L/4$ とすればよいと考えられるが、ここでは毎サンプル時刻で処理を行うことにする。

次に、スパイク検出処理について述べる。ウェーブレット成分の絶対値の最大値を求め、求めた最大値について **thresholding** を行う。64 サンプルのデータに対するウェーブレット成分 $\{w_k^{(3)}\}$ に対する判別関数 $d(\{w_k^{(3)}\})$ は (13) 式のように表される。

$$d(\{w_k^{(3)}\}) = T^h \left(\max_k (|w_k^{(3)}|) \right) \dots \dots \dots (13)$$

(13) 式は、スパイクが存在しない場合にはウェーブレット成分の絶対値の最大値は0となるため0となる。一方、

図10 スパイク検出処理による判別結果
Fig. 10. Results of inrush current discrimination by spike detection.

スパイクが存在する場合には、ウェーブレット成分の絶対値の最大値になり、0でない正の値になる。

移動ウィンドウを用いたスパイク検出処理の結果を図10に示す。励磁突入電流と短絡故障電流について、移動ウィンドウにおけるスパイク検出処理の結果を電流波形と合わせてプロットしている。2つめのスパイクがなくなったときに、励磁突入電流を判別するので、このケースでは時刻16.0 ms、励磁突入電流が流れ始めてからは11.6 msで判別できることになる。なお、図10(a)において、2つ目、4つ目のスパイクでインパルス状のひげが生じている。これは、ウェーブレット変換でウィンドウ位置をずらすと、ウェーブレット成分の大きさが変化することに起因する。このような現象を考慮した上で、ウィンドウデータにおけるスパイク検出のしきい値を設定した。

5. 考 察

本研究では、スパイク検出処理で用いるウィンドウ長は6.4 msとしたため、提案手法による判別時間は、励磁突入電流の流れる最大時間の1/2サイクルと合わせて、もっとも早い場合で1サイクル弱程度と考えられる。第2次高調波成分を用いる従来手法は少なくとも1サイクルは必要であるため、提案手法は従来手法よりは高速であるということが出来る。

上記であげた短絡故障電流の例のように、短絡故障の場合に電流が遮断されると電流波形が不連続となり、ウェーブレット成分のスパイクが検出される。通常の配電システムでは、1/2サイクルから1サイクルの時限をもつ高速なリレー要素はないため、故障除去が行われることはない。検出するスパイク数を2として、1回目のスパイクから2回目のスパイクの時間が1サイクル以内であれば、励磁突入電流であると判定する。

提案手法では、検出するスパイク数を2としたが、励磁

突入電流では電流が流れるたびにスパイクが検出されることを考慮し、検出するスパイク数を4, 6と増やすことによって励磁突入電流を判別する。しかし、検出するスパイク数を増やすと判定に要する時間が長くなってしまうため、スパイク検出性能と判定時間のトレードオフを考慮して判定基準を設定する必要がある。

高速しゃ断器が設置された需要家構内系統などでは、電流の瞬時値の大きさによって動作する高速過電流要素によって故障を検出し、1サイクル以内で故障が除去されることは起こりうる。この場合には、励磁突入電流でも過電流要素が動作するので、過電流要素が短絡故障の場合に動作し、励磁突入の場合には動作しないように整定値を選択する必要がある。このような場合は、提案手法の適用対象外のケースと考えられる。また、過電流要素ではなく不足電圧要素によって瞬低を検出するようなケースも考えられ、このような場合も適用対象外のケースと考えられる。

6. おわりに

本稿では、離散ウェーブレット変換による電流波形のウェーブレット成分を用いた励磁突入電流の判別方法を提案した。提案手法は、ウェーブレット変換によって電流波形の高周波成分を検出するものであり、ウェーブレット成分のばらつきを統計処理によって判別関数のパラメータの設定を行った。提案手法の有効性を検証するために、実機の変圧器による試験データを用いてシミュレーションを行った。その結果、半サイクルから1サイクル程度の時間で判別できることを示し、提案手法の有効性を確認した。

今後、検討結果に基づいて、より詳細な判定アルゴリズムの検討、本アルゴリズムを実装するハードウェアのアーキテクチャおよび提案手法を用いた配電系での高速保護方式の検討を進める予定である。

(平成16年10月1日受付, 平成17年4月28日再受付)

文 献

- (1) 新電力ネットワークシステム研究会 新システム技術評価分科会 分散型電源の統合制御 WG: 「分散型電源の統合制御システム」に関する検討報告書, エネルギー総合工学研究所 (2003) (<http://www.iae.or.jp/PROJECT/nws/nws.htm>)
- (2) K. Nara and J. Hasegawa: "A New Flexible, Reliable and Intelligent Electrical Energy Delivery System", *T. IEE Japan*, Vol.117-B, No.1, pp.47-53 (1997-1) (in Japanese)
奈良宏一・長谷川淳: 「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」, 電学論 B, **117**, 1, pp.47-53 (1997-1)
- (3) T. Suzuki, R. Hara, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, and I. Iyoda: "A Study on Transfer Switching in Consideration of Fault Detection in FRIENDS", *IEEE Trans. PE*, Vol.123-B, No.3, pp.324-332 (2003-3) (in Japanese)
鈴木利宏・原 亮一・北 裕幸・田中英一・長谷川淳・伊与田功: 「FRIENDSにおける事故検出を考慮した系統切り替えに関する検討」, 電学論 B, **123**, 3, pp.324-332 (2003-3)
- (4) M. Kitayama and M. Nakabayashi: "A Fast Discrimination Method of Inrush Current based on Transformer Magnetizing Characteristics", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.8, pp.982-989 (2001-8) (in Japanese)
北山匡史・仲林見幸: 「変圧器鉄心の磁化特性に基づく励磁突入電流の高速判別手法」, 電学論 B, **121**, 8, pp.982-989 (2001-8)
- (5) M. Kitayama and H. Taoka: "Discrimination of Inrush Current", The Papers of Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-97-155/PSE-97-155 (1997) (in Japanese)

- 北山匡史・田岡久雄: 「離散ウェーブレット変換を用いた励磁突入電流の判別」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-97-155/PSE-97-155 (1997)
- (6) Y. Akimoto, S. Nishida, and T. Sakaguchi: "Transformer Protection Scheme Based on a Model Including Nonlinear Magnetizing Characteristics", *T. IEE Japan*, Vol.98-B, No.8, pp.703-710 (1978-8) (in Japanese)
穂本能彬・西田正吾・坂口敏明: 「非線形励磁特性を考慮した変圧器保護方式」, 電学論 B, **98**, 8, pp.703-710 (1978-8)
- (7) K. Yabe: "Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers", *T. IEE Japan*, Vol.113-B, No.3, pp.293-398 (1997-3) (in Japanese)
矢部邦明: 「電力差動法による変圧器故障と励磁突入電流との判別」, 電学論 B, **116**, 3, pp.293-398 (1997-3)
- (8) J. Koda: "Basic Design of a Transformer Protection Relay Using Dynamic Estimation of Magnetizing Curve with Zone Shifting", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.12, pp.1477-1483 (1999-12) (in Japanese)
香田 潤: 「領域遷移型磁化曲線動的推定法を用いた変圧器保護リレーの基本設計」, 電学論 B, **119**, 12, pp.1477-1483 (1999-12)
- (9) J. Pihler, B. Grčar, and D. Dolinar: "Improved Operation of Power Transformer Protection using Artificial Neural Network", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.12, No.3, pp.1128-1136 (1997)
- (10) S. Nakano, R. Sato, M. Sato, J. Koda, and K. Yabe: "The Study of New Schemes to Block the Operation of the Differential Relay", The Papers of Technical Meeting on Power System Relaying, IEE Japan, PSR-97-4 (1997) (in Japanese)
中野 聡・佐藤力生・佐藤 真・香田 潤・矢部邦明: 「変圧器保護用比率差動リレーの新しい励磁突入電流対策の研究」, 電気学会保護リレーシステム研資, PSR-97-4 (1997)
- (11) A.M. Gaouda and M.M.A. Salama: "Power Quality Detection and Classification using Wavelet Multi-resolution Signal Decomposition", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.14, No.3, pp.1469-1475 (1999)
- (12) T. Hisakado, K. Tanaka, and K. Okumura: "Fault-Location System of Transmission Line by Wavelet Transform", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.9, pp.1139-1148 (2001-9) (in Japanese)
久門尚史・田中宏史・奥村浩士: 「ウェーブレット変換による伝送線路の故障点標定システム」, 電学論 B, **121**, 9, pp.1139-1148 (2001-9)
- (13) C.-K. Wong, C.-W. Lam, K.-C. Lei, C.-S. Lei, and Y.-D. Han: "Novel Wavelet Approach to Current Differential Pilot Relay Protection", *IEEE Trans. Power Delivery*, No.18, No.1, pp.20-25 (2003)
- (14) W. Chen, O.P. Malik, X. Yin, D. Chen, and Z. Zhang: "Study of Wavelet-Based Ultra High Speed Directional Transmission Line Protection", *IEEE Trans. Power Delivery*, No.18, No.4, pp.1134-1139 (2003)
- (15) A. Abur, O. Ozgun, and F.H. Magnago: "A Wavelet Transform-Based Method for Improved Modeling of Transmission Lines", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.18, No.4, pp.1432-1438 (2003)
- (16) A.H. Osman and O.P. Malik: "Transmission Line Distance Protection Based on Wavelet Transform", *IEEE Trans. Power Delivery*, No.19, No.2, pp.515-523 (2004)
- (17) M. Gómez-Morante and D.W. Nicoletti: "A Wavelet-based Differential Transformer Protection", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.14, No.4, pp.1351-1358 (1999)
- (18) S.Y. Hong and W. Qin: "A Wavelet-based Method to Discrimination between Inrush Current and Internal Fault", Proc. of POWERCON 2000, pp.927-931 (2000)
- (19) P.L. Mao and R.K. Aggarwal: "A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformers Using Combined Wavelet Transform and Neural Network", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.16, No.4, pp.654-660 (2001)
- (20) O.A.S. Youssef: "A Wavelet-Based Technique for Discrimination Between Faults and Magnetizing Inrush Currents in Transformers", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.18, No.1, pp.170-176 (2003)
- (21) K.L. Butler-Purry and M. Bagriyanik: "Characterization of Transients in Transformers Using Discrete Wavelet Transforms", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.18, No.2, pp.648-656 (2003)
- (22) M. Isozaki, K. Konno, T. Fujisawa, K. Shibata, T. Kanno, and H. Ishikawa: "Interrupting Performance Verification of 1-cycle High-Speed Vacuum Circuit Breaker", The Papers of Technical Meeting on Switching and Protecting Engineering, IEE Japan, SP-98-42 (1998) (in Japanese)
磯崎 優・昆野康二・藤沢浩明・柴田和郎・菅野朋人・石川 熙: 「1サイクル高速真空遮断装置の性能検証」, 電気学会開閉保護研資, SP-98-42 (1998)
- (23) T. Ohkuma, Y. Sato, Y. Iwata, N. Tokuda, Y. Matsubara, and M. Asano: "Trial Production of Fault Current Limiter System with Rectifier Reduction Model", The Papers of Technical Meeting on Static Apparatus, IEE Japan, SA-98-27 (1998) (in Japanese)
大熊 武・佐藤礼文・岩田良浩・徳田憲昭・松原克夫・浅野正邦:

- 「6.6kV 級整流型限流器モデルの試作」, 電気学会静止器研資, SA-98-27 (1998)
- (24) Y. Ohura: Protective Relay System Engineering, IEE Janan (2002) (in Japanese)
大浦好文 監修: 保護リレーシステム工学, 電気学会 (2002)
- (25) R. Ashino and S. Yamamoto: Wavelet Analysis, Kyoritsu Shuppan (1997) (in Japanese)
芦野隆一・山本鎮男: ウェーブレット解析—誕生・発展・応用, 共立出版 (1997)
- (26) M. Jansen: Noise Reduction by Wavelet Thresholding, Springer Verlag (2001)

北 山 匡 史 (正員) 1965 年 7 月 9 日生。1989 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1991 年 3 月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。先端技術総合研究所にて電力システムシステムの計画・運用に関する研究開発に従事。2005 年電気学会進歩賞受賞。計測自動制御学会, エネルギー・資源学会, IEEE 会員。