

リアルタイムデジタルフィルタを適用した電子化変流器技術の開発

Development of the electronic current transformer technology applied real time digital filter

岡田直喜*

N. Okada

保戸田悦生*

E. Hotoda

大木秀人*

H. Oki

概要

近年の受変電設備の小型化に伴い、GIS (Gas Insulated Switchgear) の小型化の要求が高まっている。本研究では、GIS に実装される変流器 (CT) の小型化を目的として、ロゴスキーコイルに高速信号処理技術を応用することにより、小型・軽量で、かつ広い直線性を持つCTの基礎技術開発を行った。

Synopsis

A miniaturization of GIS (Gas Insulated Switchgear) is desired with the miniaturization of substation equipment in recent years. In this research, we have developed a basic technology for a current-transformer (CT) with small size and a light weight, and large linearity by applying digital signal processing technology to Rogowski coil for the purpose of the miniaturization of CT.

1. まえがき

近年の高圧受変電設備の小型化に伴いGISの小型化が望まれる一方で、GISに実装する変流器 (CT) がGIS小型化の阻害要因となっている。この解決策として、大きな負担が不要なデジタル出力のCT (電子化CT) を適用することにより、CTの小型化、すなわちGISの小型化が可能となる。

今回、センサ方式としてIEC (International Electrotechnical Commission) により推奨されているロゴスキーコイルを適用し、GISの小型化を可能とする、IEC規格 (IEC60044-8) に準拠したデジタル出力定格を持つ電子化CTの基礎技術開発を行った。一般に、ロゴスキーコイルは、鉄心を用いないため小型・軽量化が可能であり、また、磁気飽和がないため広範囲において直線性が得られるなどの特長を持つ。その一方でノイズの影響を受けやすく、単一のロゴスキーコイルにより微小電流領域から大電流領域までの広いダイナミックレンジにおける電流計測を行う場合、大電流では無視できたノイズが微小電流計測時に影響するという問題がある。

本研究では、ロゴスキーコイルの優れた直線性を生かした単一コイルによるマルチレンジ電流計測と、三相通

電電流、三相過電流、および零相電流を同時に計測可能な複合型電子化CTの開発を主な目的とし、マルチレンジ計測を実現するために不可欠な微小電流領域におけるノイズ除去をデジタルフィルタにより行った。また、電子化CTを電力用途に適用する場合、要求される精度を満たすために、デジタルフィルタの高速処理、入出力間の遅延時間および抽出精度が重要となり、最適なデジタルフィルタの選定が必要となる。本稿では、電子化CTに最適なデジタルフィルタとして帰帰型DFTフィルタを選定し、この帰帰型DFTフィルタをDSPに実装し構成した電子化CTについて紹介する。

2. 電流検出センサ

2.1 従来CT

従来、GISに実装されるCTには、主に鉄心と巻線で構成されたものが用いられている。従来CTの場合、鉄心の磁気飽和により広範囲での直線性が得られないため、表1に示すように、定格一次電流および負担容量ごとに大きさの異なるものを準備する必要があった。そのため、GIS小型化の阻害要因となるだけでなく、CT選定の遅れが組立工数に影響するという問題があった。

*技術開発研究所システム研究センター

表1 定格一次電流によるCTの種類

JEC-1201-1996				定格二次電流	
定格一次電流(単位 A)					
10	100	1,000	10,000	1 5	
		1,200	12,000		
	15	150	1,500		15,000
		20	2,000		20,000
	30	3,000			
	5	40	4,000		
		50	5,000		
		60	6,000		
75		7,500			
80		8,000			

2・2 空心型CTセンサ

今回、これらの問題を解決するセンサ方式として、IECにより推奨されている空心型のログスキーコイルを適用した。その概略図を図1に示す。ログスキーコイルは、巻心に絶縁物(空心)を用いているため、原理的に磁気飽和がなく、広範囲における電流計測が可能という特長をもっている。このログスキーコイルの特長を生かし、表1の白抜き文字部分(定格一次電流40A~3000A)の電流を包括して単一コイルにより計測するマルチレンジCT機能と、過電流および零相電流を計測する機能を併せもつ複合型CTセンサの開発を行った。

また、ログスキーコイルによる電流計測においては、その出力が一次電流の時間微分値に比例した、微小な信号となるため、高周波ノイズや商用周波ノイズの影響を受け易い。そこで、このノイズ除去をデジタルフィルタにより行うものとした。

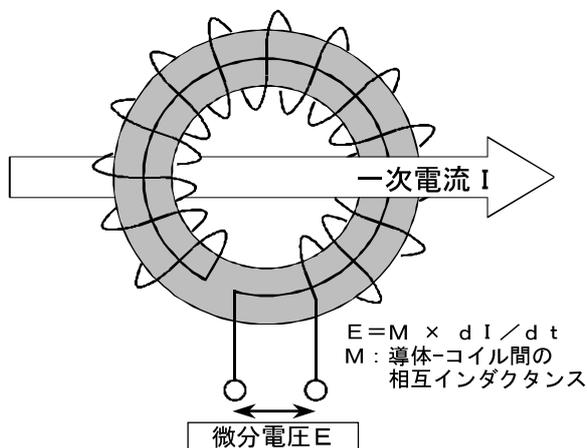
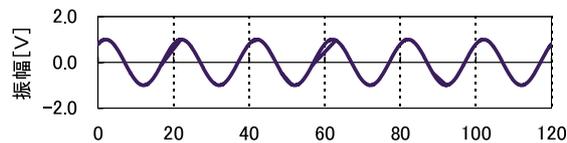
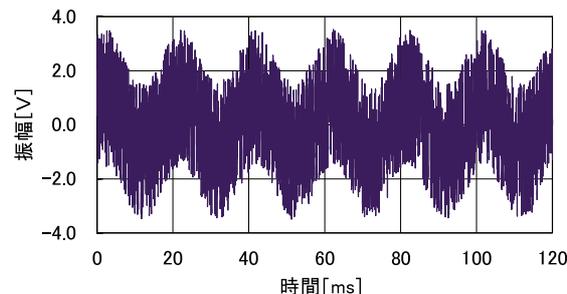


図1 ログスキーコイルの概略



(a) 正弦波入力信号



(b) ノイズ重畳信号

図2 フィルタ処理対象信号

3. デジタルフィルタ

一般にCT二次出力の確度階級は規格により定められている。この規格を満たすためには、フィルタのリアルタイム処理が要求される。ここでは、各種デジタルフィルタのリアルタイム性能を確認し、リアルタイム処理が実現可能なデジタルフィルタの選択を行った。

3・1 各種デジタルフィルタの特性

FIRフィルタ、FFTフィルタ、回帰型DFTフィルタを比較対象とし、これらのフィルタをTexas Instruments社製32bit浮動小数点演算型DSP「TMS320C6711」に実装し特性を確認した。フィルタ処理は、図2に示す振幅1.0V・50Hzの正弦波にノイズを重畳させた信号を、サンプリング周波数25kHz(40μs)でサンプリングし50Hz成分を抽出するものとした。

(1) FIR (Finite Impulse Response) フィルタ

FIRフィルタは、フィルタタップ数によりその精度が変化する特徴を持っている。フィルタタップ数を31・501・1701タップと変化させたときのFIRフィルタ処理結果を図3に示す。フィルタ出力は、入力振幅1.0Vに比べ大きく減衰し遅延が生じている。また、タップ数を上げることで信号の抽出精度は上がるが、遅延時間が大きくなる。

(2) FFT (Fast Fourier Transform) フィルタ

FFTフィルタ次数を512タップ、窓関数を矩形窓とした場合のFFTフィルタ処理結果を図4に示す。出力振幅は入力振幅1.0Vとほぼ等しいが、遅延時間は20.48msと大きい。FFT演算では1周期以上の波形データの蓄積が必要であるため、FFTフィルタでは最低でも1周期の初期遅延が生じ、それが位相遅れとなる。

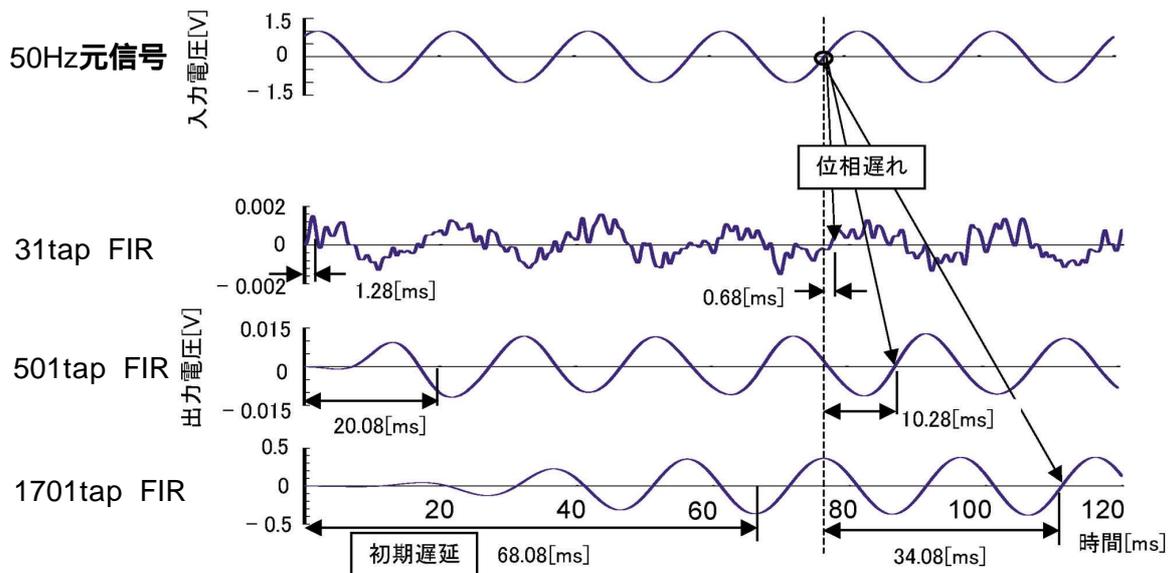


図3 FIRフィルタ処理結果

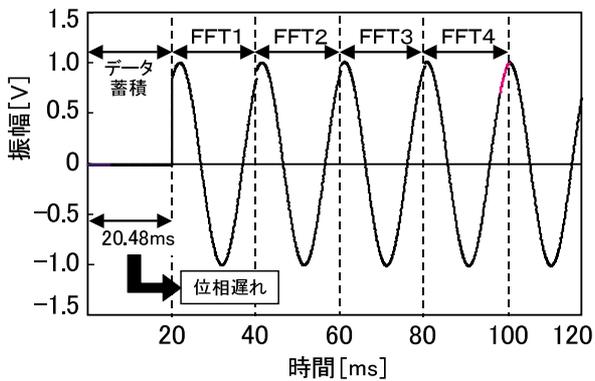
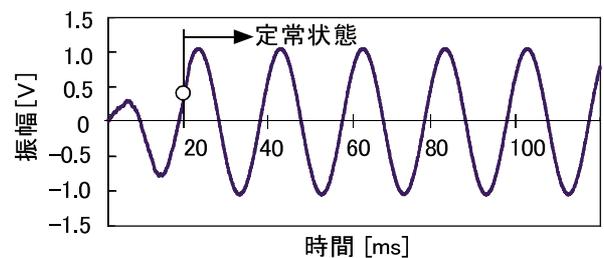
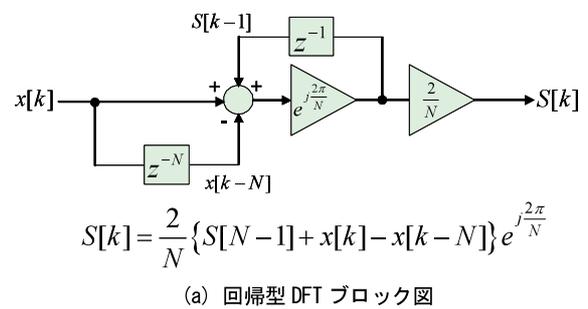


図4 FFTフィルタ処理結果



(b) DFTタップ500の場合

図5 回帰型DFTフィルタ処理結果

(3) 回帰型DFT (Discrete Fourier Transform) フィルタ
 回帰型DFTフィルタ処理の結果を図5に示す。図5(a)は、回帰型DFTフィルタの原理モデルである。図5(b)に示すようにDFTタップ数500の場合、起動後20ms (DFTタップ数×サンプリング間隔40μs) まではデータがDFTタップ数に達してないため定常状態ではなく、正しいIDFT結果が出力されていないが、その後は、入力信号に対してほとんど遅延時間なく入力振幅にほぼ等しい信号が出力されている。

3・2 リアルタイム性能の比較とフィルタ選定

前節の各デジタルフィルタの特性における遅延時間・振幅精度、および多チャンネル処理における演算時間を考慮すると、回帰型DFTフィルタが、リアルタイム処理に最も有効なフィルタといえる。従って、電子化CT用デジタルフィルタとして、回帰型DFTフィルタを採用した。

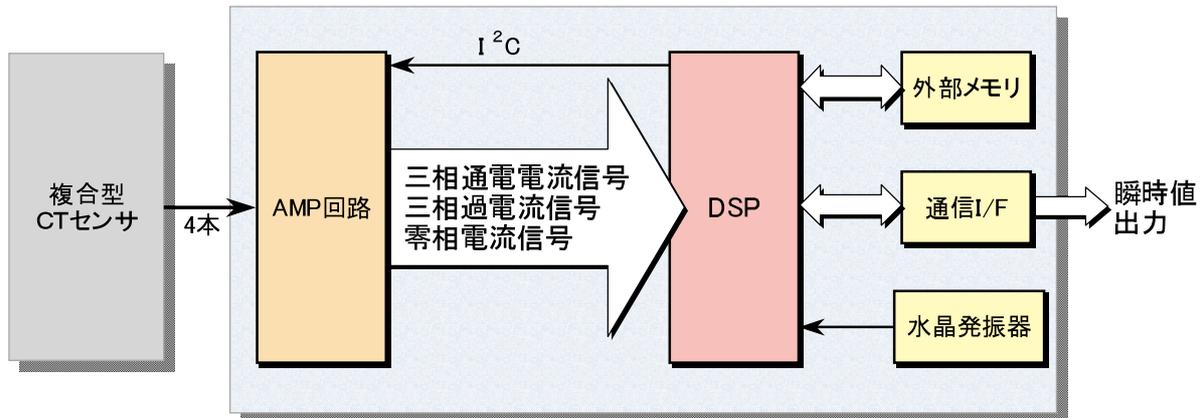


図6 開発システムのハードウェア構成

4. 電子化CTのシステム構成

本システムは、CTセンサ部、AD変換部および演算処理部からなるハードウェア、およびソフトウェアにより構成されている。

4.1 ハードウェア構成

本システムを電力用途に適用する場合、要求される機能として、三相通電電流、三相過電流、および零相電流の計測があげられる。これらの機能を満たすためのハードウェア構成を図6に示す。DSPには12bit-ADCを16ch内蔵したTexas Instruments社製32bit固定小数点演算型DSP「TMS320F2812」を用いた。各相の一次電流を開発した複合型CTセンサで検出し、増幅回路による信号増幅およびDSPによるフィルタ、積分などのデジタル処理を行い、上位機器に出力するものとした。



外形：400*190*50mm 重量：約5kg

図7 試作複合型ロゴスキーCTの写真

(1) 複合型CTセンサ

6.6kV-GISへの適用を想定して、ロゴスキーコイル

による複合型CTセンサを試作した(図7)。試作した複合型CTセンサは、三相通電電流および三相過電流計測用のコイル3個と、零相電流計測用のコイル1個により構成され、これらを一括してモールドすることで、従来の鉄心を用いた複合型CTに比べ、体積比、重量比とも1/5以下となり、大幅な小型・軽量化が実現できた。

(2) 増幅回路

DSP内蔵の12bit-ADCを使用し、一次電流定格40Aから3000Aまでを単一ロゴスキーコイルで包括するマルチレンジ方式とするため、デジタル可変抵抗器を用いた可変増幅回路の増幅率をDSPから多段階制御することで、一次電流定格毎にADCの入力レンジに対し入力レベルを調整し、ADCの分解能の最適化を図っている。

(3) DSP

DSPでは、増幅回路から三相通電電流用3ch、三相過電流用3ch、零相電流用1ch、および温度データ1chの合計8chの信号を内蔵ADCで取得している。ADCのサンプリング周波数は、国内デジタルリレーのサンプリング周波数4800Hz(at 50Hz)の2²倍、すなわち1周期96ポイントに対して2²倍とし、データ出力時に、デジタルリレーに準拠したポイント数(96/48/24ポイント)に戻している。また、DSPでは、温度データ以外の7種の信号に対し、帰帰型DFTフィルタおよび積分などのデジタル演算を行うほか、可変増幅回路制御、E²PROMリード・ライト、通信、I/O入出力監視・制御などを行っている。

4・2 ソフトウェア構成

ソフトウェア構成を図8に示す。図8(a)に示すように、AD変換されたCTセンサ信号から、デジタルフィルタ処理により所望の周波数成分が抽出され、デジタル積分処理後、電流値に換算される。デジタルフィルタ処理内容は、図8(b)に示すように、三相通電電流および零相電流用と三相過電流用とで異なる。三相通電電流および零相電流用では、帰帰型DFTフィルタにより商用周波数成分のみを抽出することにより出力を得る。一方、三相過電流用では、高調波成分を含む出力が必要となる場合があるため、帰帰型DFTフィルタにより抽出された直流成分を入力信号から減算することにより出力を得る。また、積分処理には、放電時定数[図8(c)]を持たせることにより、微少に残る直流成分を吸収可能な不完全積分方式を採用した。

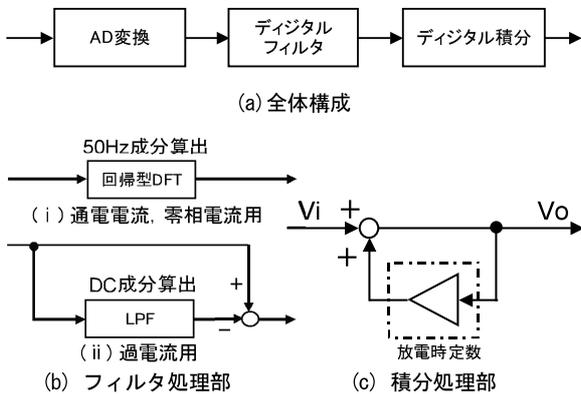


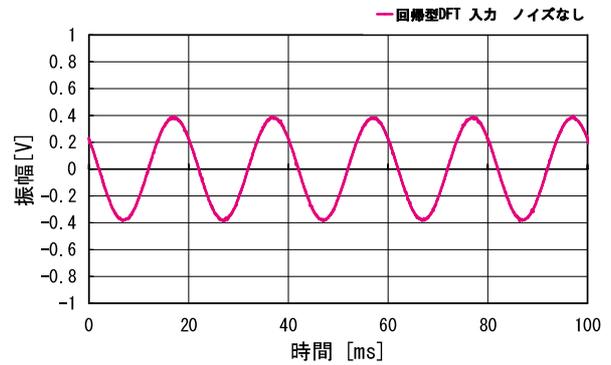
図8 ソフトウェア構成

4・3 精度向上検討

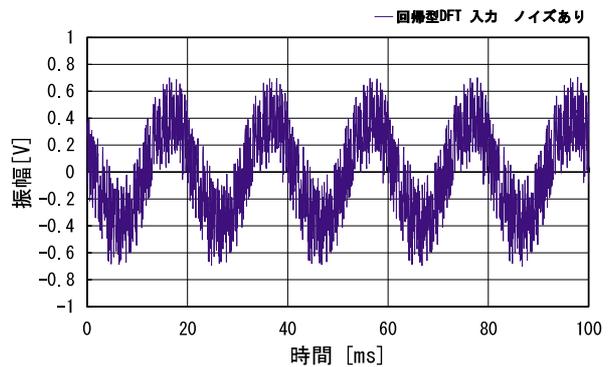
当初のADCサンプリング周波数およびフィルタタップ数は、国内デジタルリレーのADCサンプリング周波数(1周期96ポイント)およびその2倍までであったが、DSP演算速度を限界まで高速化し、またRAM・演算処理最適化などの改良も重ね、ADCサンプリング周波数およびフィルタタップ数を当初の2²倍まで達成するとともにデジタルフィルタ出力の精度向上を図った。演算処理の概要を以下に示す。

- (a) IQmathライブラリを使用し実数近似値表現方式を固定小数点化
- (b) 内部RAMの効率的使用と外部RAM - 演算器間のデータ受け渡し速度の抑制

この効果について、768タップとした帰帰型DFTフィルタを実機に実装し、入力信号振幅0.38V・50Hzの正弦波およびこれにノイズを重畳させた2種類の信号[図9(a)(b)]を用いて確認した。図10に示すように、過大ノイズが重畳された入力信号に対しても正確にフィルタリングされていることが確認できた。



(a) 入力信号 (ノイズ重畳なし)



(b) 入力信号 (ノイズ重畳あり)

図9 正弦波入力信号

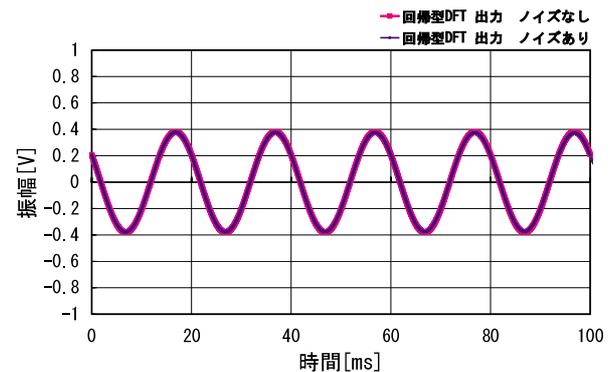


図10 帰帰型DFT結果

4・4 出力

出力データ定格は、IEC規格(IEC60044-8:電子化CT)に準拠し、データ長を16bitのデジタル出力とし、定格一次電流を2D41H(通電電流用)および01CFH(過電流用)とした。また、データレートは国内デジタルリレーに準拠し、1周期96×2ⁿポイントのデジタルフィルタ出力をデシメーションによって96×2ⁿ/2^m(96/48/24ポイント)としている。

表2 目標精度

用途	目標精度
三相通電電流用	1 P S 級
三相過電流用	3 P S 級
零相電流用	3 P 級

5. 性能検証

試作した複合型CTセンサとDSPを用いた信号処理ユニットを組み合わせて精度試験を実施した結果、表1に示した規格(JEC1201)に定められるCT定格に対して95%以上の精度達成率であった。なお、目標精度は、GISへの実装を想定し、表2に示すように、三相通電電流用、三相過電流用、および零相電流用に対してそれぞれ設定した。

6. あとがき

今回、空心型のCTセンサとDSPによるリアルタイムデジタルフィルタを組み合わせることにより、小型・軽量・マルチレンジ型を可能とした、複合型電子化CTシステムの基礎技術開発を行った。

デジタルフィルタには、FIRフィルタ、FFTフィルタ、および回帰型DFTフィルタの3種類のフィルタについて、シミュレーションによる性能比較を行った結果から、回帰型DFTフィルタを適用し、各種性能検証におい

て良好な結果を得ることができた。

今回、開発した電子化CTシステムをGISに適用することで、GISの小型化が図れるほか、CTを標準化し在庫することにより、設計工数、組立工数、改造費用などの低減が期待できると考える。

今後は課題の整理を行うとともに、さらなる性能向上検討や検証を実施していく所存である。

参考文献

- (1) [1]IEC60044-8 INTERNATIONAL STANDARD [Instrument transformers - Part8 : Electronic current transformers]
- (2) 電気学会 電気規格調査会標準規格「計器用変成器 JEC-1201-1996」
- (3) 小谷他：「ナノ領域ロゴスキーコイルの開発」、THE SCIENCE AND ENGINEERING REVIEW OF DOSHISHA UNIVERSITY, VOL.27, NO.4 FEBRUARY 1987
- (4) 三谷政昭 著："信号解析のための数学",森北出版
- (5) 三谷政昭 著："やり直しのための信号数学",CQ出版社

謝辞

本研究を行うにあたって、終始ご指導を賜った株式会社DSP応用技術研究所の首禰元隆様に深謝する。

執筆者紹介



岡田直喜 Naoki Okada
技術開発研究所システム研究センター
電力機器監視制御第1グループ



保戸田悦生 Etsuo Hotoda
技術開発研究所システム研究センター
電力機器監視制御第1グループ



大木秀人 Hideto Oki
技術開発研究所システム研究センター
電力機器監視制御第1グループ長