

최소자승 알고리즘을 이용한 디지털 보호 계전기용 고성능 FIR 필터의 VHDL 모델 설계

신재신, 김종태, 박종강, 서종완, 신명철
성균관 대학교 전기 전자 공학과

VHDL Design of High Performance FIR Filter
for Digital Protection Relay Using Least Square Algorithm

Shin Jae Shin, Kim Jong Tae, Park Jong Kang, Seo Jong Wan, Shin Myung Cheol
Dept. of Electronic & Electrical Engineering Sungkyunkwan Univ.

Abstract - 본 논문에서는 디지털 보호 계전기에 쓰이는 필터 중에서 최소 자승 알고리즘을 이용한 고성능 FIR 필터를 설계하였다. 기존의 DFT필터와 MATLAB 시뮬레이션을 이용하여 비교하였으며 FIR 필터의 VHDL모델 및 합성에 중점을 두었다. FIR 필터는 기본적으로 유한개의 임펄스 응답이 이루어지기 때문에 기타 다른 필터에 비하여 안정도가 높으며 선형적인 위상을 가지기 때문에 차단 주파수 대역의 왜곡현상을 없앨 수 있는 장점을 가지고 있다. 여러 가지 알고리즘으로 구현한 FIR 필터를 시뮬레이션 한 결과 최소 자승 알고리즘이 가장 우수한 결과를 나타내었다. 기본적으로 디지털 보호 계전기에서 디지털 필터의 기능은 사고 전압, 전류로부터 60Hz의 기본파 추출 CT, PT 왜곡 및 DC offset을 제거하는데 있다. 본 논문에서는 이러한 기능을 가지면서 샘플링 주파수와 차수를 같게 하여 FIR 필터와 DFT 필터의 주파수 응답과 연산 속도를 비교 하였다. 본 논문에서 설계된 최소 자승 알고리즘을 이용한 FIR 필터는 같은 조건의 DFT필터에 비해 1고조파와 2고조파의 차이가 10db 이상 더 우수 하였으며 연산 속도 또한 2배 이상 좋은 결과를 보였다.

1. 서 론

보호 계전기는 1901년에 처음 개발 되어 1950년대 후반의 정지형 계전기, 1980년대의 마이크로프로세서를 사용한 보호 계전기, 현재에는 디지털 신호 처리 프로세서(DSP)를 사용한 보호 계전기로 발전을 거듭해 왔다. 현대 사회에서 전력 수요의 급증은 사고의 형태 및 전력 사고의 다양화를 야기 시켰다. 이것이 아날로그 보호 계전기에서 디지털 보호 계전기로의 기술 개발이 필요하게 된 원인이 되었다.[1] 아날로그 보호 계전기의 아날로그 필터로서 현재 Butterworth 2차,4차 능동 필터를 사용하고 있으며 디지털 보호 계전기에서 IIR 필터로 Butterworth 필터를 구현 한다. 디지털 보호 계전기에 사용되는 디지털 필터의 사용 목적은 계통 사고로부터의 보호 및 측정에 필요한 원하는 특정 성분을 추출하는 것이다. 그러므로 디지털 보호 계전기의 속도와 동작 신뢰성은 적절한 디지털 필터의 설계에 의존하게 된다. 이러한 목적을 실현시키기 위하여 디지털 보호 계전기용 디지털 필터로서 여러 가지 알고리즘이 제안되었는데 이러한 알고리즘에는 이산 푸리에 변환을 이용한 DFT 필터, 블록펄스 함수를 이용한 필터, 이산 하틀리 변환을 이용한 필터, 이산 왈쉬 변환을 이용한 필터, 유한 임펄스 응답을 이용한 필터(FIR), 등이 있다.[2][4][5] 각각의 필터 마다 장점을 가지고 있지만 특히 FIR 필터는 연산수가 적어서 연산 속도와 하드웨어 복잡도면에서 타 필터에 비하여 우수한 결과를 나타내며 유한개의 임펄스 응답으로 항상 안정도가 높은 장점을 가지고 있다. 또한 FIR 필터의 선형 위상은 차단 주파수 대역에서의 왜곡을 없애는 장점을 가지고 있다.[3] 이러한 장점들은 보호 계전기의 속도를 증가시키고 동작 신뢰성을 높이는데 큰 역할을 한다.

본 논문에서는 최소 자승 알고리즘으로 구현된 FIR필터와 DFT필터를 샘플링 주파수와 차수의 조건을 같게 하여 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 결과를 비교 하였고 VHDL을 이용하여 모델링 및 FPGA로 구현 하였다.

본 논문은 2.1에서 FIR 필터 설계의 특성과 최소 자승 알고리즘을 간략하게 소개 하고 2.2에서 FIR필터와 DFT필터에 대한 주파수 응답을 시뮬레이션 한 결과를 비교하였다. 2.3에서는 삼성 0.35 um 공정 라이브러리를 사용하여 게이트 레벨 합성을 수행한 결과를 나타내었고 3에서 결론을 제시하였다..

2. 본 론

2.1 최소 자승 알고리즘.

FIR필터의 알고리즘은 이상적인 주파수 응답을 유한한 필터의 계수를 사용하여 가능한 가깝게 근사화 시키는 것이다. 그래서 모든 알고리즘의 시작점은 이상적인 주파수 응답을 가정하는데서 시작한다. 필터의 가장 중요한 장점중의 하나가 바로 선형 위상 주파수 응답이다. 선형 위상 필터의 위상 응답을 알면 설계 절차는 실수 값만으로 근사되어 질 수 있다. 다음 식은 N+1개의 계수를 가진 N차 FIR 필터의 주파수 응답을 나타낸다.

$$H(e^{j\omega T}) = \sum_{r=0}^N b_r e^{-j\omega r T}$$

최소 자승 알고리즘은 이상적인 주파수 응답을 가정하고 제로 주파수 응답과의 차를 최소한으로 줄여서 필터 계수를 정하게 된다. 다음 식은 최소 자승 식을 나타낸 것이다.

$$E_{LS} = \frac{T}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (H_0(\omega) - H_{0D})^2 d\omega$$

여기서 $H_0(\omega)$ 주파수 응답을 가진 제로 위상 필터를 나타내고 $H_{0D}(\omega)$ 는 이상적인 주파수 응답을 나타낸다. 위의 식에서 E_{LS} 를 최소화시키기 위하여 필터 계수 B(n)에 관하여 미분을 하여 원하는 필터 계수를 얻는다. 필터의 계수를 계산하는데 있어 주의해야 할 점은 샘플링 이론에 의하여 aliasing 과 symbol간의 간섭을 막기 위해서 sampling rate의 최소 rate인 Nyquist rate보다 크게 sampling frequency(f_s)를 정해 주어야 한다.[6] 즉.

$$f_s > 2f_{max}$$

여기서 f_{max} 는 최대 주파수이다.

2.2 시뮬레이션

필터의 차수가 높아지면 원하는 주파수 응답에 근사화를 시킬 수 있지만 하드웨어 복잡도와 동작 속도가 느려지기 때문에 필터 차수와 원하는 주파수 응답의 적절한 선정이 필요하다. 본 논문에서는 MATLAB의 필터 디자인 툴을 이용하여 필터 계수를 구하고 시뮬레이션 하였다. 비교된 DFT필터와 마찬가지로 샘플링 주파수는 720Hz로 정하였고 필터 계수의 차수는 12차수를 사용하였다. 본 논문에서 사용된 필터는 대역 통과 필터를 사용했으며 추출되는 데이터 성분은 60Hz 성분이다. 데이터를 16bit으로 표현하였고 필터 계수는 8bit으로 표현하였다. 시뮬레이션에 쓰인 데이터는 다음과 같다. 그림1은 EMTP에서 모의 실험한 계통 사고의 3상 전압, 3상 전류 데이터를 MATLAB에서 나타낸 그림이다. 계통 사고는 송전 선로의 송전단에서 발생한 사고의 그림이다.

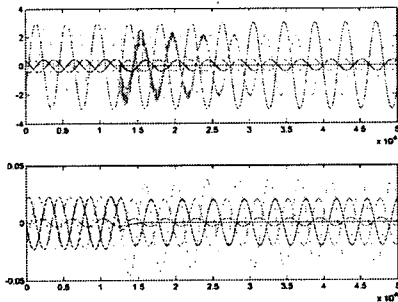


그림 1 계통 사고 데이터

전압, 전류의 크기는 1:40000으로 축소하였다. 위의 그림에서 전압의 크기가 점점 줄어드는 지점에서 선간 단락 사고가 난 것을 알 수 있다. 위의 데이터를 가지고 DFT 필터와 최소 자승 알고리즘을 사용한 FIR 필터의 PSD(power spectral density)는 다음과 같다. 각각의 데이터는 내부 연산 중에 양자화 시켰다.

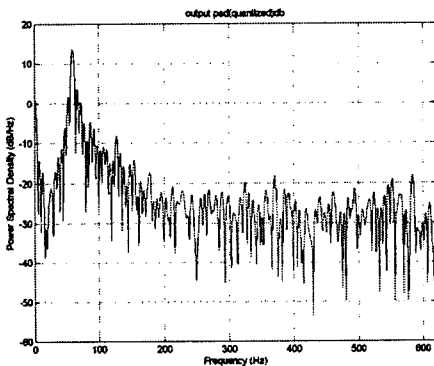


그림 2 DFT필터의 PSD

그림 2와 3은 DFT, FIR 필터 각각의 PSD이다. DFT 필터의 PSD와 FIR필터의 PSD를 비교했을 때 60Hz 성분을 추출해내는 크기가 FIR필터가 DSP 필터보다 대략 5db 더 높은 결과를 나타내었다. 또한 2고조파가 되는 120Hz의 성분을 1고조파인 60Hz와의 차이를 비교 했을 때 FIR필터가 DFT필터 보다 15db 더 높은 결과를 나타내었다. 즉, FIR필터는 DFT필터보다 기본 파를 추출하는데 있어서 더 높은 결과를 나타내었다.

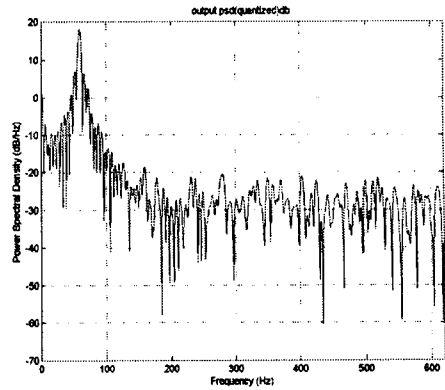


그림 3 최소자승법을 이용한 FIR 필터

다음의 그림 4와 그림 5는 DFT필터와 FIR필터의 주파수 응답을 나타낸 그림이다.

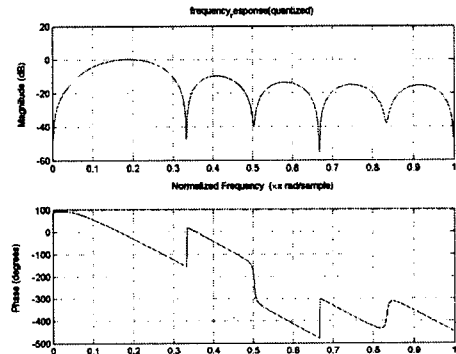


그림4 DFT필터의 주파수 응답

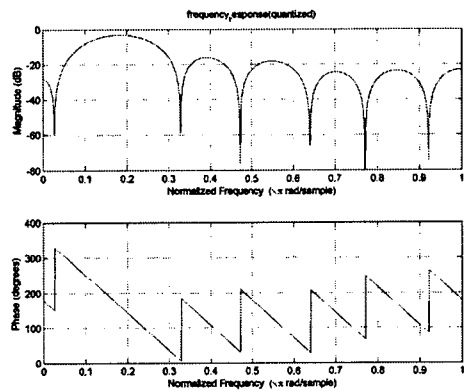


그림5 FIR필터의 주파수 응답

각각의 그림은 크기 응답과 위상 응답을 나타내고 있다. 정규화된 주파수의 계산은 다음과 같이 계산 된다.

$$w = 2\pi f / f_s$$

주파수 응답은 PSD와 마찬가지로 FIR필터가 DFT필터 보다 1고조파와 2고조파의 차이가 15db더 높은 결과를 나타내었다. 두 필터간의 위상 응답을 비교하면 FIR필

터는 완전히 선형적인 위상의 특성을 나타내는 반면 DFT필터는 종종 비 선형적인 특성을 나타내고 있다. 이것은 FIR필터가 데이터 성분에서 전압, 전류의 정보를 추출해 낼 때 위상 값이 일정하게 변하기 때문에 실수 값만을 다루는 반면 DFT필터의 경우에는 허수 값도 다루어야 한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 DFT필터는 FIR필터보다 더 많은 연산을 수행하고 연산 속도 또한 DFT필터 보다 우수하다는 것을 알 수 있다.[3] DFT필터는 고조파 제거 성능과 특정 주파수 성분 추출에 대한 크기 이득이 양호하지만 샘플링 수에 대한 일 반적인 연산수를 구할 수 없으며 허수부를 계산해야하는 이중적인 연산이 필요하여 샘플링 수가 증가할수록 FIR 필터에 비해 연산 부담이 매우 증가 된다.

표1은 DFT필터와 FIR필터의 기본과 추출시 연산수와 연산 속도, 시뮬레이션 했던 PSD의 결과를 나타내었다.

표1 성능비교 (N=13)

	DFT	FIR
기본파추출 (60hz)(psd)	13db	18db
1,2 고조파 차	25db	36db
연산수	$(N-3) \times 2 + ((N/4-1) \times 2)$	$N + (N-1)$
연산속도	1	2

2.3 FIR 필터의 RTL설계 및 합성 결과

2.2절에서 제안한 FIR필터의 사양을 바탕으로 VHDL 을 이용하여 RTL(register transfer level)의 FIR 필터를 설계하였다. FIR필터는 direct form으로 설계 하였으며 필터의 리소스로서 Synopsys의 DesignWare 라이브러리를 사용하였다.[7] (16bit×8bit) 곱셈기는 4단의 파이프라인을 가진 Wallace-tree 곱셈기를 사용하였다. 사고 발생시 빠른 속도의 데이터 응답을 보장 받기 위하여 임계 경로 지연 이 작은 곱셈기를 사용하였다. 16bit 덧셈기는 clf(fast carry look ahead) 덧셈기를 사용하였으며 삼성 0.35um 공정 라이브러리를 사용하였다. 표2와 그림 6 은 합성한 결과를 나타내고 있다.

표2 FIR 필터의 합성 결과

총 면적	21,040 gates
임계 경로 지연 시간	4.3 ns

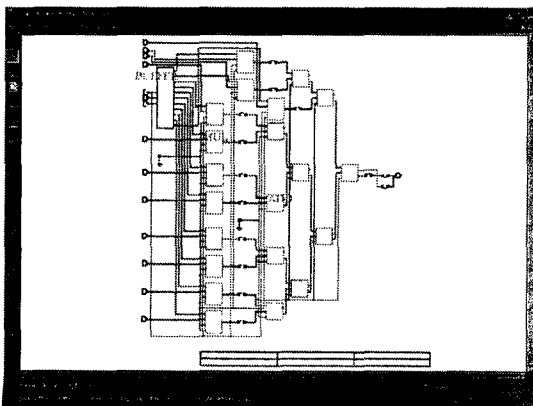


그림 6 FIR필터의 회로도

3. 결 론

본 논문에서는 디지털 보호 계전기용 디지털 필터를 선정하기 위해 DFT필터와 FIR필터의 기본과 추출의 주파수 응답 및 PSD, 연산수를 비교한 결과 기본과 추출에서 FIR필터가 DFT필터보다 5db 더 우수한 결과를 보였고 기본파 와 2고조파 차이의 크기가 13db 더 우수하였으며 연산 속도 면에서도 FIR필터가 2배 우수한 결과를 나타내었다. 또한 VHDL을 이용하여 빠른 속도와 계통 사고 발생시 빠른 반응 속도를 위한 임계 경로 지연이 작은 결과를 나타내는 설계 및 합성을 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 과학기술처, "마이크로프로세서를 이용한 전자식 배전반 개발", 한국 과학 기술 연구소, pp13-14, 1990
- [2] 권기백, "단일 프로세서를 이용한 전력용 변압기의 다기능 디지털 보호계전기 설계", 성균관 대학교, pp28-31, 2002
- [3] D.sclitharle "Digital Filters Basic and Design", Springer, 2000
- [4] A.J. Degens, "Microprocessor implemented Digital filters for Inrush Current Detection", Electrical Power and Energy System, Vol.4, No3, pp.196-205, July, 1982
- [5] M.A.Rahman and P.K.Dash, "Fast Algorithms for Digital Protection of Power Transformers", IEE proceeding-C. Generation, Transmission and Distribution, Vol, 129, PartC, No.2, pp79-85, March, 1982
- [6] James H.McClellan, Ronald W.Schafer, Mark A.Yoder "DSP FIRST", PRENTICE HALL, pp .87-90, 1999
- [7] Synopsys "Design Ware Foundation Library DataBook", 1998