

정확한 주파수 계측을 위한 DFT 필터의 적용

박철원*, 이하나*

강릉원주대학교 전기정보통신공학부*

An Application of DFT for Accurate Frequency Measurement

Chul-Won Park*, Ha-Na Lee*
Kangnung-Wonju National University*

Abstract - 전력계통이 대규모, 다양화됨에 따라 계통의 안정화를 위한 광역보호계전 지능화 기술 개발이 요구되고 있다. 이를 위해서 네트워크 기반 주파수 모니터링 및 고장예측 시스템 개발 분야에 관심이 증대되고 있다. 본 논문은 정확한 주파수 계측을 위해서 요소기술로 필수적으로 사용해야하는 DFT 필터의 크기 응답, 위상 응답 등에 대해 연구하였다.

1. 서 론

근래 저탄소 및 녹색성장과 온실가스감축 이행에 대한 비전이 제시됨에 따라 전력IT 기술을 기반으로 한 지능형전력망(Smart Grid) 등에 대한 관심이 증대되고 있다. 아울러 전력계통이 대규모, 다양화됨에 따라 계통의 안정화를 위한 광역보호계전 지능화 기술 개발에 대한 요구가 커지고 있다. 전기에 대한 의존도가 높아짐에 따라 광역정전사고(wide-area blackout)가 발생할 경우, 이로 인한 사회적, 경제적 피해의 규모는 더욱 기하급수적으로 증가하게 될 것으로 예상된다. 광역 계통 보호를 위해 전압/전류, 유효전력 및 무효 전력 등의 정보가 필요한데, 실제로는 이에 대한 정보의 수집과 공유가 쉽지 않기 때문에 최근 계통 주파수를 모니터링하여 고장을 예측하려는 광역보호계전 지능화 기술이 용이한 것으로 발표되었다. 광역정전을 유발할 수 있는 시초고장(seed fault) 검출하는 것이 무엇보다 중요하다[1]. 이에 GPS(Global Positioning System)를 통해 넓은 영역의 주파수를 동시에 정확하게 계측하고, 주파수 변동에 대한 감시를 통해 고장 발생 지역을 검출하고 이를 계통으로부터 차단함으로써 대규모 정전 사고를 미연에 방지할 수 있다[2].

본 논문에서는 광역보호계전 지능화의 기초가 되는 요소기술로서 주파수를 정확하게 계측, 예측하기 위해 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform : DFT) 필터에 대해서 살펴보고, DFT 필터의 크기 응답 및 위상 응답 등에 대해 연구하였다[3~5]. DFT 필터에 대한 성능 평가는 PSCAD/EMTDC로 구성된 송전선로의 모델계통[6,7] 사례연구를 통하여 수집된 시뮬레이션 데이터를 이용하여 이루어졌다.

2. 디지털 필터

전력시스템의 전압 및 전류신호는 사고나 개폐 등의 과도상태가 발생하면 계통의 시정수에 따라 고조파 성분과 직류 오프셋(DC-offset) 성분이 포함되어 왜곡된다. 이에 계통의 상태를 해석하거나 계전기의 신호로 사용하기 위해서는 연산이 간편하고 효과적인 디지털 필터의 설계가 필수적인데, 현재 가장 많이 사용되는 것이 DFT 필터이다[8].

2.1 DFT 필터

시변계의 아날로그 $g(t)$ 를 한 주파수 윈도우에 대해 주기당 동일한 간격으로 N 샘플링하여 얻은 이산신호를 $g(n)$ 이라고 하면, $g(n)$ 의 DFT $G(k)$ 는 식(1)이 된다[9].

$$G(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n) W_N^{nk} \tag{1}$$

여기서, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 로서 주파수이고, $W_N^{nk} = e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}$ 로서, 복소평면상의 단위원 원주상을 $1/N$ 원주씩 움직이는 점으로 표시된다.

$G(k)$ 의 이산푸리에 역변환(Inverse Discrete Fourier Transform : DFT)은 식(1)로부터 식(2)가 된다.

$$g(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} G(k) W_N^{-nk} \tag{2}$$

여기서, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 로서 시간영역의 이산신호 수열이다.

식(1)과 식(2)를 비교하면, DFT와 IDFT는 W_N^{nk} 의 지수 부호와 N으로 나눈 점만이 다를 뿐 서로 비슷하기 때문에 상호 가역적이며 쌍대성이 존재하게 된다. 오일러공식을 적용하면 식(2)는 식(3)이 된다.

$$G(k) = \sum_{n=0}^{N-1} g(n) (\cos \frac{2\pi nk}{N} - j \sin \frac{2\pi nk}{N}) \tag{3}$$

k_m 순간(시간 $t=kT$)에서 샘플된 전류신호(샘플링 주기 T) $i(k)$ 를 고려하여 고조파성분 n_m 의 푸리에 사인 성분(imaginary part : 허수부)과 코사인 성분(real part : 실수부)은 식(4)가 된다.

$$\begin{aligned} FS_n(k) &= \frac{2}{N} \sum_{r=0}^{N-1} i(k-r) \sin \frac{2\pi nr}{N} \\ FC_n(k) &= \frac{2}{N} \sum_{r=0}^{N-1} i(k-r) \cos \frac{2\pi nr}{N} \end{aligned} \tag{4}$$

그러므로 임의의 순간 고조파성분 n_m 의 크기 제곱은 식(5)가 된다.

$$h_n^2 = FS_n^2 + FC_n^2 \tag{5}$$

그런데 식(4)를 신속하게 구할 수 있도록 푸리에 계수(Fourier Coefficient)를 구하여 차분방정식(difference equation)으로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 편의상 이산전압신호 $v(n)$ 를 주기당 동일한 간격으로 12샘플링한 경우((sampling number : 12)에 대하여 서술하고 한다. 기본 주파수(기본파) 성분(fundamental frequency component) 추출을 위하여, 사인파와 코사인파에 대한 상호상관(cross-relation)을 함으로써 필터의 출력을 차분방정식으로 표현하면 식(6)이 되고, 크기는 식(7)이 된다[10].

$$\begin{aligned} F_{i1}^{12}(k) &= \frac{2}{12} [(-v_{k-2} + v_{k-8}) \\ &\quad + 0.86603(-v_{k-1} - v_{k-3} + v_{k-7} + v_{k-9}) \\ &\quad + 0.5(-v_k - v_{k-4} + v_{k-6} + v_{k-10})] \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} F_{i1}^{12}(k) &= \frac{2}{12} [(-v_{k-5} + v_{k-11}) \\ &\quad + 0.86603(v_k - v_{k-4} - v_{k-6} + v_{k-10}) \\ &\quad + 0.5(v_{k-1} - v_{k-3} - v_{k-7} + v_{k-9})] \end{aligned} \tag{7}$$

$$F_1^{12}(k) = \sqrt{F_{i1}^{12}(k)^2 + F_{d1}^{12}(k)^2} \tag{7}$$

여기서 $F_{i1}^{12}(k)$ $F_{d1}^{12}(k)$ 는 각각 k번째 순간 필터링 후의 추출된 기본파 성분의 실수부와 허수부이고, 위첨자는 샘플링수가 된다.

그런데 시간 영역상에서 N개의 점 $g(0), g(T), \dots, g((N-1)T)$ 가 주어졌다고 가정하면 Z 변환으로 표시할 수 있고 $Z = e^{j\omega T}$ 를 대입하면 주파수 스펙트럼도 표현할 수 있다[10].

결국 주파수 ν 에 대한 DFT 필터의 진폭 응답(magnitude response : 크기 응답) $|A(\nu)|$ 은 식(7)이 되고, 위상 응답(phase response) $|B(\nu)|$ 은 식(8)이 된다.

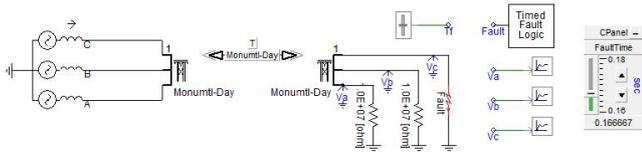
$$|B(\nu)| = \tan^{-1} \left(\frac{F_{d1}^{12}}{F_{i1}^{12}} \right) \tag{8}$$

3. 사례연구

3.1 모델계통

DFT 필터의 적용 타당성을 확인하기 위하여 선택한 모델계통은 그림 1과 같이, Monumental-Day 222.07 [km]로 구성된 500 [kV]의 송전선로(T/L)이다[7]. 사고모의는 PSCAD/EMTDC 4.2.1에서 0.5[sec]동안 수행

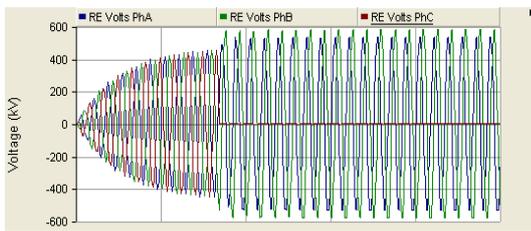
되었다. 고장의 종류는 C상 1선지락사고, 고장발생시간은 0.1666667[sec]로 정상상태 후 약 10주기째로 가정하였다. 주기당 샘플링 수는 12이기 때문에 주기당 샘플링 간격(sampling interval)은 1.388889[ms]가 된다.



〈그림 1〉 모델계통

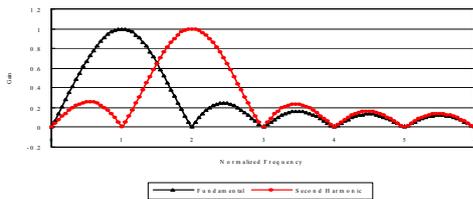
3.2 시뮬레이션

그림 2는 시뮬레이션을 수행한 PSCAD/EMTDC에서의 수전단 3상 전압의 순시치이다. X축은 시간으로 단위는 [sec]이고, Y축은 전압으로 단위는 [kV]이다. 그림 3은 동일한 경우의 엑셀로 나타낸 3상 전압의 순시치이다. 그림 2와 그림 3으로부터 3상 전압이 평형으로 안정이 되었다가 0.1666667[sec]에서 C상 1선지락고장이 발생한 직후 C상 전압은 0으로 적어지고 다른 두상의 전압은 불평형이 되는 것을 알 수 있다.

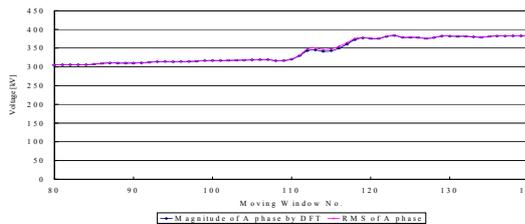


〈그림 3〉 수전단 3상 순시치 전압

그림 4는 샘플링수가 12인 경우 기본파 및 제2고조파에 대한 DFT 필터의 크기에 대한 주파수 응답이다. 그림으로부터 각각 기본파와 제2고조파인 경우 크기 응답이 가장 크고 다른 주파수성분에 대한 이득이 없기 때문에 필터의 특성이 만족되는 것을 알 수 있다.



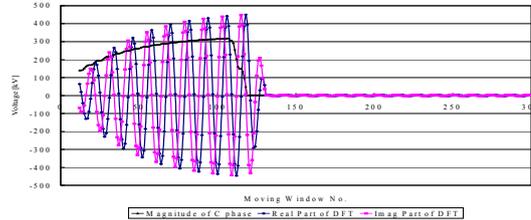
〈그림 4〉 주파수 응답(12 samples per cycle)



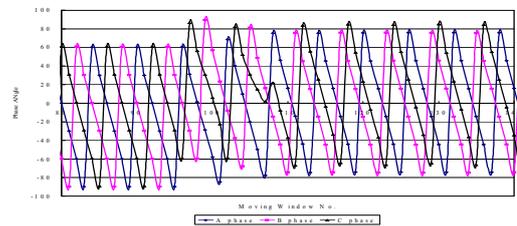
〈그림 5〉 DFT의 크기와 RMS의 비교(A상 전압)

그림 5는 A상 전압에 대해서 DFT 필터로 추출된 크기와 실효치(RMS)의 비교를 나타낸다. 그림으로부터 실효치의 값은 고장이 발생한

경우 고조파가 함유되어 있기 때문에 부정확한 반면, DFT 필터를 사용하여 기본파를 추출한 크기는 정확한 값이 되는 것을 알 수 있다. 고조파가 많이 포함되는 경우에는 더욱 그 차이가 많이 나게 된다. 그림 6은 C상 전압을 DFT 필터를 통해 기본파를 추출한 결과이다. 고장이전에는 실수부, 허수부, 크기가 추출되나 직접지락사고이기 때문에 고장직후 전압이 0으로 되어서 사고이후에는 기본파가 추출되지 않음을 알 수 있다. 그림 7은 이때의 위상각 변화를 나타낸다. 고장발생이전에는 3상전압위상의 차이(상차각)이 120도 정확하게 차이가 발생하나, 고장발생후에는 3상전압이 불평형상태가 되어 위상차가 불규칙하게 됨을 알 수 있다.



〈그림 6〉 DFT 필터에 의한 기본파 추출(C상 전압)



〈그림 7〉 위상각의 변화(3상 전압)

4. 결 론

본 연구에서는 PSCAD/EMTDC 모델계통의 시뮬레이션 데이터를 활용하여, DFT 필터의 크기 응답 및 위상 응답을 MATLAB의 Script m 파일로 프로그램을 작성하여 그 성능을 확인하였다. 주파수를 비롯한 전력시스템의 신호를 정확하게 계측하기 위해서는 DFT 필터가 필수적으로 적용되어야 한다고 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이승철 외 2인, “실시간 광역정전 해석 및 대처기반 기술 연구”, 산업자원부 최종보고서, pp. 1~138, 2008.3.
- [2] 박철원, “광역보호계전 지능화를 위한 네트워크 기반 주파수 모니터링 및 고장예측 시스템 개발실시간 광역정전 해석 및 대처기반 기술 연구”, 지식경제부 전력산업연구개발 사업계획서, pp. 1~35, 2008.12.
- [3] M.A. Rahman, B. Jeyasurya, “A State-Of-The Art Review Of Transformer Protection Algorithms”, IEEE Trans. On Power Delivery, pp. 534~544, Vol. 3, No. 2, April, 1988.
- [4] Y.V.V.S. Murty, M.A. Rahman, “A Stand-Alone Digital Protective Relay For Power Transformer”, IEEE Trans. On Power Delivery, pp. 85~95, Vol. 6, No. 1, Jan., 1991.
- [5] M.S. Sachdev, George D. Rockefeller, “IEEE Tutorial Course Computer Relaying”, IEEE Service Center, 79 EH0148-7-PWR, pp. 1~79, 1979.
- [6] Manitoba HVDC Research Centre Inc., “PSCAD(Power Systems Computer Aided Design) User’s Guide”, pp. 1~504, Jan., 2003.
- [7] Manitoba HVDC Research Centre Inc., “Introduction to PSCAD/EMTDC”, pp. 1~131, 2003.
- [8] 박철원의 3인, “지능형 보호계전기를 위한 최적 디지털필터의 선정에 관한 연구”, 1996년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 664~667, 1996.7.
- [9] 박철원, 민병철, “특정 주파수 추출을 위한 여러 가지 디지털 필터의 특성 비교”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 360~362, July, 2004.
- [10] 전주환, 박부건, 권옥현, “MATLAB을 이용한 디지털신호처리”, 시그마프레스 pp. 1~502, 2005.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(08527) 주관으로 수행된 과제임.