

디지털 신호처리를 이용한 전력계통 주파수 측정에 관한 연구

(A study on the Measurement of Power system Frequency using Digital Signal Processor)

이정우* · 오용택**

(Jung-Woo Lee · Yong-Taek Oh)

Abstract

A frequency in electrical power system changes by the load fluctuation in utility grid, has an influence on a connected generator, and ultimately brings a big trouble in the power system. Therefore, a quick measurement of system frequency and governor control of power system is a very important factor in the reliability and the economic feasibility. Electromagnetic frequency relays in the past had the large power consumption and the difficulty of accurate measurement. After Researched and developed digital relays are very affected by the noise and the distortion, and the recently developed Microprocessor relays have problems of expensive device and time when measuring the frequency at 50[ms].

In this study, An improve algorithm that measures the power system frequency quickly and accurately is suggested, simulated by using Matlab and programmed using C code through DSP6713 KIT. This algorithm is tested to the arbitrary voltage waveform input. The results show that the suggested algorithm is effective in the accurate and quick frequency measurements.

Key Words : Frequency, Measurement, DSP, Power, Load

1. 서 론

주파수는 전력계통의 중요한 운전정수이다. 전력계통의 주파수는 계통 내에 발전전력과 부하 및 손실전력의 합이 같을 때 일정하게 유지된다. 그러나 만일

발전 전력이 부하 및 손실 전력의 합보다 적으면 주파수는 감소하기 시작하고, 반면에 발전 전력량이 부하 및 손실전력의 합보다 크게 되면 전력계통의 주파수는 커진다. 그러므로 전력계통의 공칭주파수를 60[Hz]를 유지하는 것이 중요하다. 계통 내에 견인할 수 있는 주파수 변화는 계통 내에 발전기 회전 특성에 의해 통제되고, 발전기가 공진점에 가까이 회전하는 경우에는 터빈에 치명적인 손상을 초래한다. 고로 정상주파수로 빠르게 복구되어짐으로써 계통의 주파수를 안정적으로 유지할 필요가 있다.

* 주저자 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과
** 교신저자 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수
Tel : 02-1234-5678, Fax : 02-1234-5678
E-mail : beastwoo@kut.ac.kr
접수일자 : 2010년 12월 6일
1차심사 : 2010년 12월 9일
심사완료 : 2011년 1월 15일

이와같이 만일 정상치와 편차가 생기면 전력계통에서 빠르게 부족주파수 및 과주파수를 측정하여 복구 조치가 수반되어야만 한다. 주파수를 정확하고 빠르게 측정함으로써 부족주파수 계전기가 동작하면 부하를 차단하고, 과주파수 계전기가 동작하면 발전기의 출력을 조정하여 전력계통의 복구 조장을 수행하여야 한다.

주파수 측정 장치는 전자기형, 반도체형 및 마이크로 프로세서형으로 구분하는데 전자기형은 정격주파수의 $\pm 0.1 \sim \pm 0.2$ [Hz]의 범주로 한정하고, 반도체형[1]은 영점(zero crossing) 사이에 시간 주기를 탐지하여 측정하는 방법으로서 여러번 반복하여 영점을 횡단하는 경우 및 잡음이나 노이즈에 의한 영점의 이동에 따른 심각한 오차를 만들어 낼 수 있다. 마이크로프로세서형은 주파수를 추정하기 위해 전압신호를 샘플링하고 디지털화하는 과정을 수반한다[2-6]. 이들 방법 역시 신호에 존재하는 고조파에 심각하게 영향받음으로써 오차를 수반하게 된다.

계통의 주파수 복구 조장에 있어 잡음이나 고조파 요소에 의해 왜곡될 수 있는 전압파형으로부터 신속하고 정확하게 계통주파수를 측정하는 것은 가장 중요한 부분이다. 즉 부족 주파수나 과주파수를 빠르고 정확하게 검출함으로써 필요한 복구조장을 신속하게 수행할 수 있도록 하여야 한다. 최근에 적용 알고리즘들[7-8]을 이용하여 빠른 측정방안을 제시하였으나, 상당한 계산량을 필요로 하고, 경제적으로 실제 적용하는데 문제가 있다.

본 연구에서는 전력계통의 운전 주파수 측정에 관한 설계, 계산적인 측면 검토 및, 디지털 신호처리기 적용방안에 대하여 제시하였다. 제시한 기술은 정격 주파수 및 인접 주파수의 추정을 기존의 방법과 비교하여 상대적으로 적은 계산 및 40[ms] 정도의 빠른 시간 내에 가능하게 하였고, 제안한 방법은 디지털 신호처리를 이용한 빠르고 정확한 주파수 측정 방법을 구현함으로써 임의의 전압 유사 전력계통 주파수 신호에 대한 시뮬레이션을 실시하여 효용성을 검토하였다.

2. Matlab을 이용한 알고리즘 구현

2.1 주파수 측정 알고리즘

본 연구에서 제작한 DSP 적용 주파수 측정 방법의 알고리즘은 다음 그림 1과 같다.

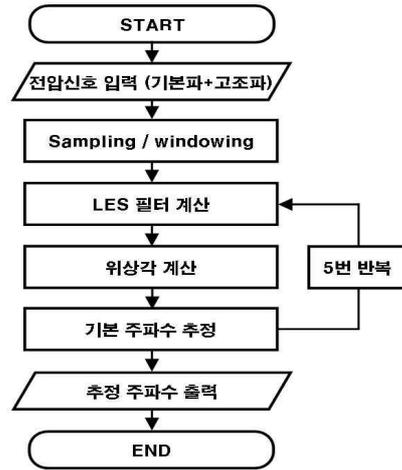


그림 1. 주파수 측정 알고리즘
Fig. 1. Frequency measurement algorithm

사용된 알고리즘은 우선 임의의 기본 주파수를 가진 입력 전압신호를 샘플링 주파수 f_s 로 샘플링하여 디지털 값으로 변환한다. 이 값들은 window 크기 범위의 구간으로 나뉘어 정렬이 되는데 이때, window 구간과 구간의 차이는 계산의 왜곡을 막기 위하여 샘플링 간격 $1/f_s$ 만큼 벌어져 겹쳐진다. 기본 주파수의 실수부와 허수부를 추출하기 위하여 (n)번째 window 구간이 가진 sampling값을 LES(least error square) filter를 이용하여 계산한다[7]. 이때 가장 먼저 계산될 구간의 주파수에는 기준이 될 60[Hz]를 입력하여 다음 구간과의 위상차를 계산하기 위한 견본인 실수부와 허수부를 추출한다[9-10]. 알고리즘에 사용된 기본 변수는 다음과 같다.

- f_s (Sampling rate) : 720[Hz]
- window 크기 : 60[Hz] 한 주기의 13 samples
- 신호는 기본 주파수 성분만 존재한다고 가정(60[Hz])

추출된 실수부와 허수부를 계산하여 위상각 Θ_n 을 구한다. 다시 (n+1)번째 window 구간을 계산해 위상각 Θ_{n+1} 을 구한다. 위상차, $(\Theta_{n+1} - \Theta_n)$ 는 한 샘플링 간격 내에서 위상각의 회전을 의미한다. 이 위상차는 추정 주파수, \hat{f} 를 얻기 위해 다음과 같은 식 (1)을 이용한다.

$$\hat{f} = (\theta_{n+1} - \theta_n) / (2\pi / f_s) \tag{1}$$

단 : f_s 는 Sampling rate

구해진 추정 주파수는 LES filter의 기준 주파수 성분의 값이 되어 다시 계산된다. 이같이 한 window 구간마다 반복 계산을 실시해야만 각 구간에서의 정확한 주파수를 계산할 수 있으나, 본 연구에서는 5번의 반복 계산만으로도 정확한 주파수 추정이 가능함으로서 주파수 추정 시간을 단축하기 위해 알고리즘의 반복 계산 설정을 5번으로 지정하였다.

2.2 Matlab을 이용한 시뮬레이션

본 연구에서는 제시한 주파수 측정 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 알고리즘의 시뮬레이션은 아래와 같은 순서를 통해 해당 입력전압 신호의 주파수를 측정하기 위하여 반복적으로 계산된다.

① 임의의 전압 신호 입력

전압 신호 구성 = M × (기본파 성분) + N × (3고조파 성분)

단 : 기본파 성분의 범위는 57[Hz]~63[Hz]

M과 N은 각 전압신호의 크기

그림 2는 주파수 63[Hz]인 기본파와 3고조파를 합성한 그래프의 예로서 Matlab을 이용하여 생성하였으며, 기본파 성분의 크기는 10이고 3고조파의 크기는 2이다.

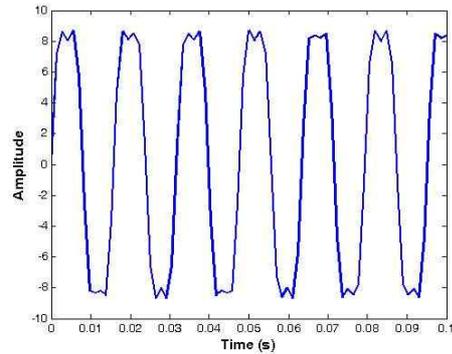


그림 2. 3고조파가 포함된 입력신호
Fig. 2. Input signal with three harmonics

② 아래 그림 3과 같이 0.1초의 시간동안 720[Hz]로 샘플링하고 13개의 sample값 씩 windowing하여 메모리에 저장한다. 총 window 구간의 수는 61개이다.

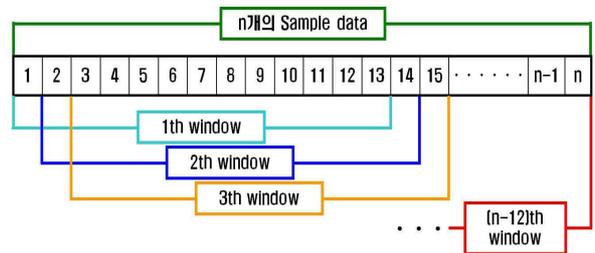


그림 3. 샘플링과 윈도우링
Fig. 3. Sampling and Windowing

③ 실수부와 허수부 추출

첫 번째 window 구간의 샘플값을 아래와 같은 식의 LES 필터에 통과시켜 입력신호 기본 주파수의 실수부와 허수부를 추출한다. 식 (2)는 Matlab에서 사용된 LES 필터 식으로서 sin 성분과 cos성분으로 행렬 [A]를 만들고 이를 의사역행렬로 계산한 후 1행과 2행에 해당 window 구간의 샘플값을 각각 곱하고 각행을 모두 더한다. 계산된 1행의 합은 통과된 window구간의 실수부가 되고, 2행의 합은 허수부가 된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} \sin(i \times 2\pi \times \frac{f}{f_s} \times k) & \cos(i \times 2\pi \times \frac{f}{f_s} \times k) \end{bmatrix} \tag{2}$$

단 : f는 기본 주파수, f_s 는 샘플링 주파수
i와 k는 미리 계산된 필터 계수

④ 위상각 계산

추출한 실수부와 허수부를 계산하여 위상각을 아래와 같은 식으로 계산하고 프로그램 시작 시 계산된 기준 기본파(60[Hz]) 위상각과의 위상차를 계산한다.

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3)$$

단 : x는 실수부, y는 허수부

⑤ 주파수 추정

계산된 위상차를 식 (1)을 사용하여 기본 주파수를 구한다. 구해진 기본 주파수는 다시 LES 필터에 적용되어 반복 계산을 수행하며, 또한 구해진 기본 주파수는 다음 위상차를 이용한 식 (1)계산에서 기준 기본파로 적용된다. 이 절차를 5번 반복하여 해당 window 구간의 기본 주파수를 추정한다.

⑥ 추정 주파수 출력

마지막으로 반복 절차를 통해 계산된 각 window 구간의 추정된 주파수 값들이 출력되며 이를 그래프로 그리면 40[ms]이내에 63[Hz]로 수렴하는 것을 그림 4와 같이 알 수 있다.

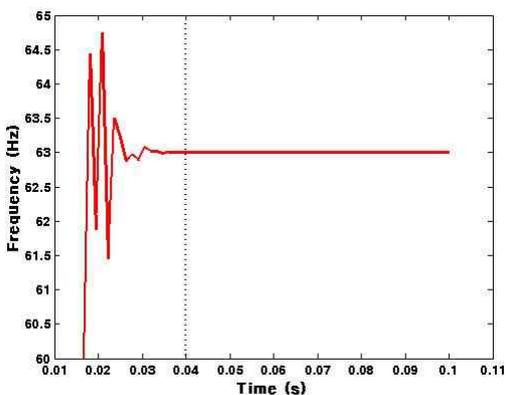


그림 4. 기본파 주파수 63[Hz]로 수렴하는 추정곡선
Fig. 4. The estimated curves converge to the fundamental frequency 63[Hz]

3. DSP 적용 측정 결과 및 검증

본 연구의 주파수 측정 알고리즘을 적용하기 위한 DSP 장치는 TI사의 TMS320C6713 DSP Starter KIT(C6713 DSK)로서 225/300[MHz]의 프로세서 속도를 가지고 있고, 16메가의 SDRAM 메모리와 1메가의 Flash 메모리를 탑재하고 있다. 초당 1800메가의 처리 능력과 AIC23 코덱을 이용한 간편한 A/D, D/A 컨버터 능력을 수행할 수 있는 신호처리 장치로서 본 연구의 주파수 측정 알고리즘을 적용하여 실험하기 위해 선정하였다.

C6713 DSK CCS(Code composer studio)를 사용해 알고리즘을 C언어로 프로그래밍하고 그림 5와 같은 C6713 DSK에 로딩하여 주파수의 범위를 57[Hz]부터 63[Hz]까지 변화해 가며 측정을 해보았다.

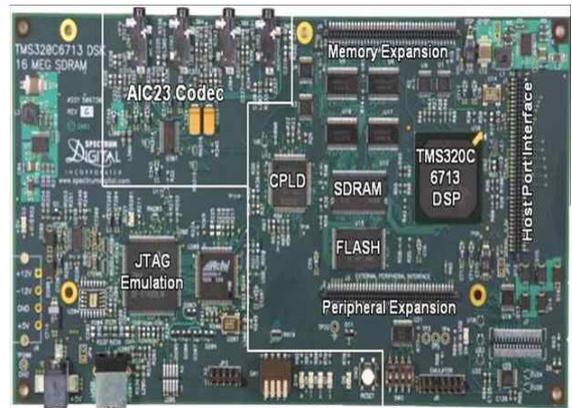
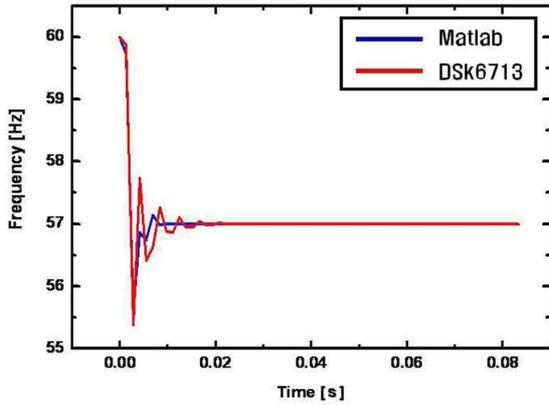


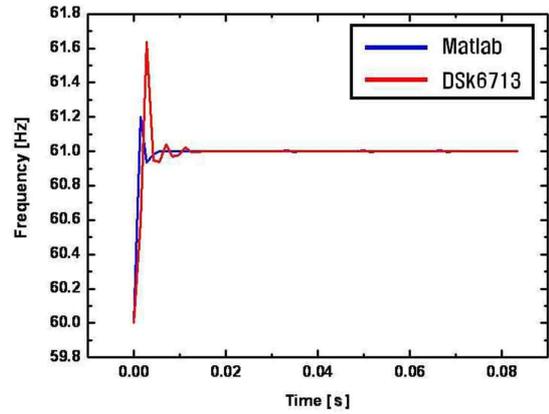
그림 5. C6713 DSK
Fig. 5. C6713 DSK

장치가 올바르게 작동하고 있는지 알기 위해 DSP 적용 주파수 측정 수렴 시간과 Matlab 시뮬레이션 수렴 시간을 비교해 보았으며 그 결과, 모두 40[ms] 내에서 해당 기본 주파수로 수렴하고 있음을 확인할 수 있어 장치가 정확하게 동작하고 있음을 알 수 있다.

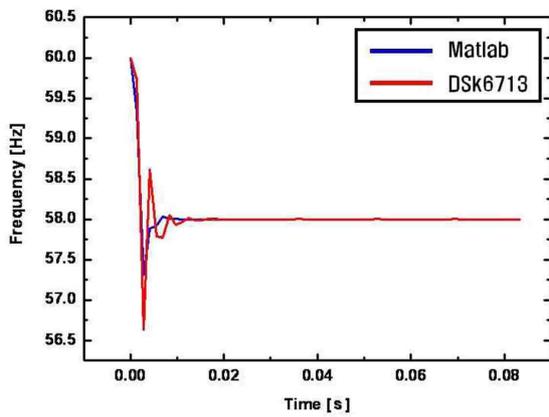
그림 6의 경우 계통의 주파수가 60[Hz] 미만으로 떨어지는 부족 주파수 현상을, 그림 7의 경우 60[Hz]를 초과하는 과주파수 현상을 가정하고 시뮬레이션한 결과로서 모두 20[ms] 안에서 수렴하고 있음을 볼 수 있다.



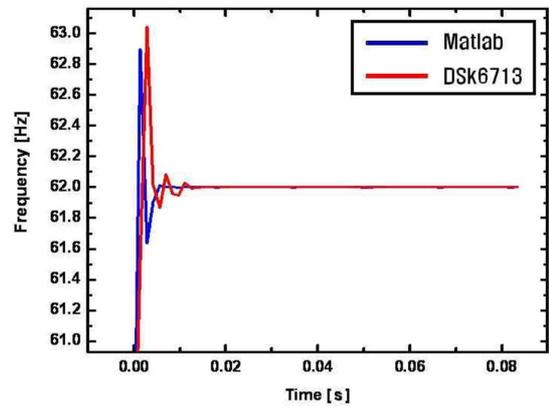
(a) 57[Hz] input voltage signal



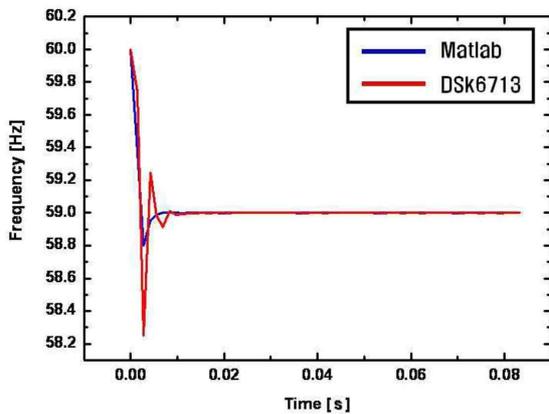
(a) 61[Hz] input voltage signal



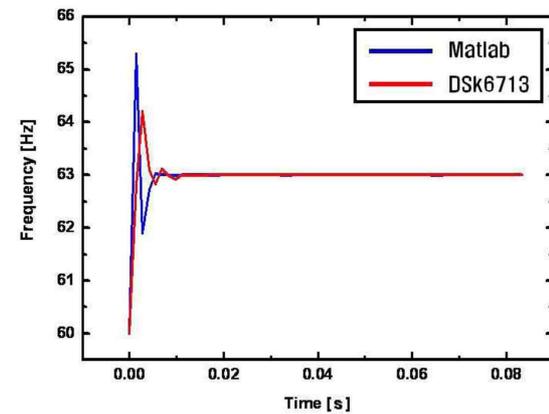
(b) 58[Hz] input voltage signal



(b) 62[Hz] input voltage signal



(c) 59[Hz] input voltage signal



(c) 63[Hz] input voltage signal

그림 6. 60[Hz] 미만 부족 주파수 일때의 측정 결과
Fig. 6. The measurement results when the under-frequency of less than 60[Hz]

그림 7. 60[Hz] 초과의 과주파수 일때의 주파수 측정 결과
Fig. 7. The measurement results when the over-frequency of greater than 60[Hz]

그러나 아래 표 1과 표 2와 같이 DSP 주파수 측정 수렴 시간을 정리하여 오차를 확인해 본 결과 20[ms] 안에서의 수렴은 정확한 게 아님을 알 수 있다.

표 1. 부족 주파수일때 수렴시간에 따른 오차 범위
Table 1. Error range of convergence time when the under-frequency

단위	기본 주파수 [Hz]					
	57	오차	58	오차	59	오차
시간 [ms]						
10	59.88	+2.88	59.73	+1.73	59.73	+0.73
20	55.37	-1.63	56.62	-1.38	58.25	-0.75
25	57.73	+0.73	58.61	+0.61	59.24	+0.24
30	56.40	-0.60	57.18	-0.82	58.88	-0.12
35	56.91	-0.09	57.86	-0.14	59.01	+0.01
40	57.06	+0.06	58.05	+0.05	58.98	-0.02
50	57.00	0.00	58.00	0.00	59.00	0.00

표 2. 과주파수일때 수렴시간에 따른 오차 범위
Table 2. Error range of convergence time when the over-frequency

단위	기본 주파수 [Hz]					
	61	오차	62	오차	63	오차
시간 [ms]						
10	60.58	-0.42	61.52	-0.48	62.80	-0.2
20	62.63	+1.63	63.04	+1.04	64.21	+1.21
25	61.94	+0.94	61.01	-0.99	62.09	-0.91
30	59.94	-1.06	61.86	-0.14	62.84	-0.16
35	61.04	+0.04	62.08	+0.08	63.07	+0.07
40	60.97	-0.03	61.95	-0.05	62.99	-0.01
50	61.00	0.00	62.00	0.00	63.00	0.00

부족 주파수일 때나 과주파수일 때 모두 주파수 수렴 시 약 30[ms]까지의 시간동안은 약 ±1[Hz]이상인 큰폭의 오차로 맥동하고 있음을 확인할 수 있다. 시간에 따른 반복 계산으로 인해 35[ms] 부근에서는 오차의 폭이 약 ± 0.1[Hz]로 줄어들었고, 40[ms] 이후 부터는 오차가 약 ± 0.05[Hz] 정도로 작아져 비교적 정확하게 해당 주파수로 수렴하여 측정하고 있음을 알 수 있다. 고로 오차의 폭이 가장 작아지는 수렴 시간대인

40[ms]가 가장 정확한 DSP적용 주파수 측정 시간대임을 알 수 있다.

4. 비교 분석 및 고찰

표 3. C6713 DSK의 주파수 수렴 테이블
Table 3. Frequency convergence table of the C6713 DSK

단위	기본 주파수 [Hz]					
	57	58	59	61	62	63
시간 [ms]						
10	59.88	59.73	59.73	60.58	61.52	62.80
20	55.37	56.62	58.25	62.63	63.04	64.21
25	57.73	58.61	59.24	61.94	61.01	62.09
30	56.40	57.18	58.88	59.94	61.86	62.84
35	56.91	57.86	59.01	61.04	62.08	63.07
40	57.06	58.05	58.98	60.97	61.95	62.99
.
.
.
100	57.00	58.00	59.00	61.00	62.00	63.00

표 4. Matlab의 주파수 수렴 테이블
Table 4. Frequency convergence table of the Matlab

단위	기본 주파수 [Hz]					
	57	58	59	61	62	63
시간 [ms]						
10	59.71	59.33	59.37	61.20	62.89	65.29
20	55.61	57.03	58.79	60.93	61.63	61.90
25	56.86	57.88	58.95	60.98	61.90	62.73
30	56.94	57.95	58.98	61.00	62.01	63.03
35	57.03	58.03	59.00	60.99	62.00	63.00
40	56.98	58.00	59.00	61.00	62.00	63.01
.
.
.
100	57.00	58.00	59.00	61.00	62.00	63.00

표 3은 C6713 DSK에서 출력한 각 주파수들의 수렴 시간을 나타내고, 표 4는 Matlab에서 출력한 주파수들의 수렴 시간을 나타낸다. 표 3과 표 4를 비교하면 C6713 DSK은 입력 신호의 기본주파수로 수렴하는데 약 40[ms]정도가 걸리고 반면 Matlab에서는 약 30[ms]정도가 걸린다. 10[ms]의 차이가 나는 이유를 생각해볼 때 우선 Matlab의 연산 능력이 DSP의 연산 능력보다 뛰어나서 연산 속도의 차이가 발생하였다고 추정할 수 있다. 반면 CCS 프로그래밍의 문제일수도 있다. C언어의 프로그램을 보다 원활하고 빠르게 연산 할 수 있도록 보완을 한다면 Matlab과의 연산 속도 차이를 개선할 수 있을 것이다.

5. 결 론

전력 계통의 안정화와 신뢰도 제고를 위해서 계통 주파수의 정확하고 신속한 측정은 필수 요소이다. 본 연구는 LES filter를 이용한 반복절차 알고리즘을 작성, 적용 가능성을 검토하였고, DSP를 활용하여 보다 신속하고 정확하게 주파수를 측정하는 방법을 제시하고, 임의의 신호 파형에 대한 주파수 측정의 효용성을 검토하였다. 향후 PSCAD 시뮬레이터를 이용하여 실제 계통의 주파수와 유사한 변화 데이터를 DSP에 입력함으로써 정확하고 신속한 실시간 주파수 측정 처리 능력을 확인하고자 한다. 또한 3고조파 뿐만이 아닌 5고조파, 7고조파 등의 상위 고조파들에 대한 LES filter를 적용하여 알고리즘을 보완하고자 한다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2010년도 춘계학술대회(2010. 5. 6, 현대성우리조트)에서 발표하고 우수 추천논문으로 선정된 논문임.

References

[1] Westinghouse Electric Corporation, "Applied Protective Relaying", Relay and Telecommunication Div., Carol Springs, Florida, U.S.A., 1982.
 [2] Phadke, A.G., Thorp, J., Adamiak, M., "A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency and Rate of Change of Frequency", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,

Vol. 102, No5, pp. 1025-1038, 1983.
 [3] Sachdev, M.S. and Giray, M.M., "A Least Square Technique for Determining Power System Frequency", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 2, pp. 437-443, 1985.
 [4] Girgis, A.A. and Hwang, T.L.D., "Optimal Estimation of Voltage Phasors and Frequency Deviation Using Linear and Non-Linear Kalman Filtering", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No. 10, pp. 2943-2949.
 [5] Begovic, M.M., Djuric, P.M., Dunlap, S. and Phadke, A.G., "Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, NO. 2, pp. 481-486, 1993.
 [6] Sachdev, M.S. and Giray, M.M., "Off-Nominal Frequency Measurements in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, pp. 1573-1578, 1989.
 [7] Sachdev, M.S. and Ibaribeau, M.A., "A New Algorithm for Digital Impedance Relay", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, pp. 2232-2240, 1979.
 [8] Terzija, V.V., "A New Self-Tuning Algorithm for Frequency Estimation of Distorted Signals", pp. 95, IEEE PES 1995.
 [9] 오준식, 김레오, 허재성, 박재균, 오용택, "주파수 측정을 위한 개선된 알고리즘 개발", 한국산학기술학회 2008년도 춘계학술발표논문집, pp.95-97, 2008.
 [10] 이정우, 안종현, 오용택, "DSP를 이용한 개선된 주파수 측정 알고리즘 구현", 한국해양정보통신학회 2009년도 추계학술발표논문집, pp.95-97, 2009.

◇ 저자소개 ◇



이정우 (李政宇)

1980년 9월 16일생. 2009년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2009년~현재 한국기술교육대학교 전기전자공학과 재학중(석사).



오용택 (吳龍澤)

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1991년 한국전력공사 근무. 1987년 한국전력공사 정보처리처 과장 역임. 1991년~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기전공 교수. 2007년 호주 퀸스랜드 대학교 방문 연구원.