

# TEO&DESA를 활용한 Auto-synchronizer의 전압 파라미터 측정에 관한 연구

A Study on Measurement of Voltage Parameters using TEO&DESA in Auto-synchronizer

신 훈 철\* · 한 수 경\*\* · 유 준 수\*\*\* · 조 수 환†  
(Hoon-Chul Shin · Soo-Kyeong Han · Joon-Soo Lyu · Soo-Hwan Cho)

**Abstract** - The Auto-synchronizer is essential equipment for synchronizing a generator to the power system. It is performing that measurement of the magnitude, frequency and phase of the voltage signal of the power system and generator. It is important to select the appropriate measurement algorithm for preventing various problem such as mechanical stress and Electrical problem. Teager Energy Operator(TEO) and Discrete separation algorithm(DESA) is measurable the instantaneous parameters of a sine wave using 5 samples and can be measured at a fast and with a simple operation. Therefore it has many advantages in measuring the parameters. In this paper, it confirmed measurement results using matlab simulations when there are synchronized in order of frequency, magnitude. Also it presented methods using digital filters and sample intervals to improve accuracy.

**Key Words** : Auto synchronizer, DESA, Frequency measurement, Phase measurement, TEO

## 1. 서 론

운영 중인 계통에 대한 발전기의 병입은 모선과 발전기의 각 상별 두 전압신호의 동일한 크기, 주파수, 위상은 필수적이며, 병입 발전기를 조정하여 조정이 불가능한 계통과 동일한 전압을 가지도록 하는 과정을 동기화라고 한다. 이 때, 동기화 과정은 수동 동기화(Manual synchronizing)와 자동동기화(Automatic synchronizing)로 구분된다. 수동 동기화는 사람이 미터기를 통해 직접 판단하여 출력을 조정하며, 동기 조건 만족 여부를 확인한 후 병입하는 방법을 의미한다. 수동 동기화 방법은 다양한 형태로 존재하지만, 일반적으로 전압계, 램프, 동기 검정기를 활용한다. 전압계를 이용하여 발전기와 모선의 전압 크기를 비교하며, 램프는 전위차에 의해 발생하는 밝기의 깜빡임으로 주파수와 위상차를 확인한다. 램프는 주파수차이가 클수록 깜빡임의 속도가 빠르며, 위상의 차이에 의해 밝기의 정도가 다르게 나타난다. 동기 검정기는 두 전압의 주파수 및 위상차에 의해 발생하는 코일의 자계로 주파수와 위상 차이를 판별하며, 12시 방향일 때 주파수 및 위상이 동기화되었음을 의미한다[1].

사람이 측정된 결과를 통해 변동 지시를 내리는 수동 동기화

와 달리, 자동 동기화는 장치가 모선 및 발전기의 전압 신호를 동시에 취득하여 파라미터의 측정값을 비교하고, 오차에 따라 발전기를 제어한다. 따라서 자동 동기화는 수동 동기화에 비해 빠른 병입 속도를 가질 뿐만 아니라 정확한 측정값을 사용하여 오차의 감소로 다양한 문제의 발생 빈도를 줄일 수 있다[2].

PMU(Phasor Measurement Unit), 전력품질 분석 장비와 같은 데이터 취득 및 분석을 목적으로 하는 장비와 다르게 표 1의 IEEE 기준처럼 정밀한 측정이 필요할 뿐만 아니라 측정값에 따른 조정 및 투입 등의 지연시간이 발생하므로 동기화 시간을 감축하기 위해 빠른 측정이 필요하다[3]. 또한 발전기 비동기 투입은 발전기의 급작스러운 동기화로 인한 로터의 기계적 스트레스뿐만 아니라 계통의 전압 변동을 유발하는 등 다양한 문제를 유발한다[1]. 따라서 자동동기화 장치에서의 파라미터 측정 결과는 빠른 측정 속도뿐만 아니라 정밀한 측정, 높은 신뢰성이 필요하다.

일반적으로 전압의 크기, 주파수, 위상 측정에 사용되는 기법은 표준에서 제시하는 샘플 데이터를 이용하는 방법 또는 DFT(Discrete Fourier Transform)를 이용한 주파수 영역에서의 해석을 통한 측정 방법이 존재한다. 국제 표준 IEC 61000-4-30에서 제시하는 파라미터 측정 방법을 이용하여 표 1 기준의 오차를

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Sangmyung University, Korea.  
E-mail: shcho@smu.ac.kr

\* Dept. of Energy Grid, Sangmyung University, Korea.

\*\* Korea Power Exchange(KPX), Korea

\*\*\*Electrical Engineering System(E2S), Korea

Received : March 2, 2018; Accepted : June 27, 2018

표 1 발전기 동기화를 위한 IEEE 표준[5]

Table 1 IEEE standard for generator synchronization[5]

성능 파라미터	IEEE C50.12 / IEEE C50.13
전압(%)	0 ~ 5%(계통 전압 기준)
주파수(Hz)	± 0.067Hz
위상(degree)	±10°

가지도록 측정하기 위해서는 긴 측정 시간뿐만 아니라 높은 샘플링 주파수가 동반되어야 된다. 또한 완전한 사이클에 대한 측정이 필수적이다[4-6].

주파수 영역 기반의 파라미터 측정방법은 노이즈 및 고조파와 같은 외란에 대해서도 정확히 측정이 가능하고 샘플링 주파수에 큰 영향을 받지 않는다는 장점이 있지만 일정 측정 주기이상의 시간이 필요해 빠른 측정이 어렵다. 또한 기준 주파수에 따라 누설성분에 의한 오차가 발생한다[7]. 이를 보완하기 위해 창 함수(Window function), IFFT(Interpolated Fast Fourier Transform), FXT 등 다양한 방법이 연구되어 왔다. 창 함수를 활용한 방법은 측정주기에 따라 발생하는 누설성분이 감소하지만, 입력신호에 적합한 주 로브(Main lobe), 보조 로브(Sub lobe)에 따른 설계가 어렵고, 짧은 측정 주기에서는 신호 왜곡이 발생하여 주파수 측정에 어려움이 발생한다. IFFT는 보간법을 활용하여 이산영역의 연산으로 관찰이 불가능한 영역에 대한 측정이 가능하다. 기존 DFT와 비교했을 때, 누설성분 감소 효과를 통해 오차가 감소하지만, DFT 특성으로 기준 주파수 외의 주파수 범위에서 표1의 기준을 만족하는데 어려움이 존재한다. FXT는 입력 신호에 대한 허수부분을 계산하여, 측정 주기에 따라 위상을 보정하는 방법으로, 크기의 정확도는 향상되지만 신호 왜곡으로 주파수는 정확한 측정이 어렵다[7-10]. 이외에도 필터의 이득차를 이용하는 cos/sin 이득차 측정, VVV(Virtual Vector-Voltmeter) 측정 방법, Adaptive notch filter를 활용하여, 남은 주파수 성분이 0에 가까울 때까지 계수를 수정하여 주파수를 측정하는 방법 등이 존재한다[11-13].

전압 신호의 파라미터를 측정할 수 있는 방법 중 TEO (Teager energy operator)는 음성신호 해석을 위해 개발된 측정 기법으로, 기존의 연구에 따르면 전력분야에서는 주로 전력품질 측정에 사용되고 있다[14-16]. TEO는 순간적인 크기, 주파수 및 위상의 측정값을 DESA(Discrete Energy separation algorithm)를 통해 신호의 일부를 사용하여 취득할 수 있다. 따라서 기존의 측정 방법과 다르게 순간적으로 빠른 측정이 가능하다. 하지만 적은 샘플링을 이용한 측정방법으로 외란에 취약하다는 단점이 존재하여 오차 감소를 위해서는 추가적인 알고리즘의 구성이 필요하다[17-19].

본 논문에서는 자동 동기화 장치의 측정알고리즘으로서 TEO & DESA를 이용한 파라미터 측정방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 TEO&DESA를 이용한 파라미터들의 측정 방법을 소개하고, matlab을 통해 임의로 생성된 발전기 및 모선 전압 신호에 대한 측정 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 TEO&DESA 알고리즘의 문제점을 해결하고 정확도 향상을 위해 개선된 알고리즘을 제시하려고 한다.

## 2. TEO&DESA를 이용한 파라미터 측정 방법

TEO는 초기 음성신호해석을 목적으로 개발된 측정기법이다. 음성신호의 정현파 형태 특성을 사용하여 순간적인 각 파라미터의 측정이 가능한 방법으로, 전압신호는 음성신호와 동일하게 정현파 특성을 가지고 있기 때문에 TEO를 이용하여 각각의 파라미

터 측정이 가능하다.

연속영역에서의 정의된 정현파 신호(x(t))에 대한 TEO( $\Psi[x(t)]$ )는 아래 식 (1)과 같이 정의된다[16].

$$\begin{aligned} x(t) &= A \cos(\omega t + \theta) \\ \dot{x}(t) &= -A \omega \sin(\omega t + \theta) \\ \ddot{x}(t) &= -A \omega^2 \cos(\omega t + \theta) \\ \Psi(x(t)) &= (\dot{x}(t))^2 - x(t)\ddot{x}(t) = A^2 \omega^2 \end{aligned} \quad (1)$$

장치를 통한 알고리즘의 구현을 위해서 이산영역으로의 변환은 필수적이며, 이산영역에서의 TEO는 아래 식 (2)를 이용하여 유도할 수 있다. 이때,  $\omega$ 는 디지털 주파수를 의미하며, 샘플링 주파수  $F_s$ 에 의해  $\omega = 2\pi f/F_s$ 로 표현된다.

$$\begin{aligned} x(n) &= A \cos(\Omega n + \phi) \\ x(n-1) &= A \cos(\Omega(n-1) + \phi) \\ x(n+1) &= A \cos(\Omega(n+1) + \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

아래 식 (3)의 삼각함수 공식에 의해 정리하면, 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta)\cos(\alpha - \beta) &= \frac{1}{2}[\cos(2\alpha) + \cos(2\beta)] \\ \cos(2\alpha) &= 2\cos^2(\alpha) - 1 = 1 - 2\sin^2(\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x(n-1)x(n+1) &= A^2 \cos^2(\Omega n + \phi) - A^2 \sin^2(\Omega) \\ &= (x(n))^2 - A^2 \sin^2(\Omega) \end{aligned} \quad (4)$$

이때, 샘플링 주파수가 매우 클 경우, 즉 샘플링 주기가 매우 작으면  $\omega \approx \sin(\omega)$ 이므로 변환된 이산영역에서의 TEO는 식 (5)처럼 표현할 수 있다.

$$\Psi(x(n)) = A^2 \sin^2(\Omega) = (x(n))^2 - x(n-1)x(n+1) \quad (5)$$

TEO를 사용하여 순간적인 크기 및 주파수를 측정하기 위해서는 DESA 알고리즘을 사용하여 성분을 분리하여야 한다. 일반적으로 사용되는 DESA 알고리즘은 DESA-1, DESA-1a, DESA-2 등이 존재하며, 1과 2는 변화량 계산에 사용되는 샘플의 개수를 의미하고 a는 비대칭적 변화를 의미한다[12,14].

$y(n) = x(n) - x(n-1)$ 이라고 가정할 때, 각 DESA를 이용한 크기 및 주파수 계산 방법은 아래 표 2와 같다[17].

두 전압 신호의 위상차의 측정은 아래 식 (6)과 같이 정의된 두 전압신호 각각의 TEO와  $\Psi_{\text{cross}}[v_1, v_2]$ 를 이용하여 위상을 측정할 수 있다[18].

$$\begin{aligned} v_1 &= A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) & v_2 &= A_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \\ \dot{v}_1 &= -A_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) & \dot{v}_2 &= -A_2 \omega_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2) \\ \ddot{v}_1 &= -A_1 \omega_1^2 \cos(\omega_1 t + \theta_1) & \ddot{v}_2 &= -A_2 \omega_2^2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \end{aligned} \quad (6)$$

두 신호에 대한  $\Psi_{\text{cross}}[v_1, v_2]$ 는 아래 식 (7)처럼 정의되며,

$$\Psi_{\text{cross}}[v_1, v_2] = \Psi(v_1, v_2) + \Psi(v_2, v_1) = 2\dot{v}_1 \dot{v}_2 - v_1 \ddot{v}_2 - v_2 \ddot{v}_1 \quad (7)$$

$\Psi_{\text{cross}}[v_1, v_2]$  식을 정리하면,

표 2 TEO&DESA를 이용한 크기 및 주파수 계산

Table 2 Magnitude and frequency calculation using TEO & DESA

DESA-1	$A(n) \approx \sqrt{\frac{\Psi(x(n))}{1 - \left(1 - \frac{\Psi(y(n)) + \Psi(y(n+1))}{4\Psi(x(n))}\right)^2}}$ $\Omega(n) \approx \cos^{-1}\left(1 - \frac{\Psi(y(n)) + \Psi(y(n+1))}{4\Psi(x(n))}\right)$
DESA-1a	$A(n) \approx \sqrt{\frac{\Psi(x(n))}{1 - \left(1 - \frac{\Psi(y(n))}{2\Psi(x(n))}\right)^2}}$ $\Omega(n) \approx \cos^{-1}\left(1 - \frac{\Psi(y(n))}{2\Psi(x(n))}\right)$
DESA-2	$A(n) \approx \frac{2\Psi(x(n))}{\sqrt{\Psi(y(n))}}$ $\Omega(n) \approx \frac{1}{2} \cos^{-1}\left(1 - \frac{\Psi(x(n+1)) + \Psi(x(n-1))}{2\Psi(x(n))}\right)$

$$\begin{aligned} \Psi_{cross}[v_1, v_2] &= 2A_1A_2w_1w_2 \sin(w_1t + \theta_1) \sin(w_2t + \theta_2) \\ &+ A_1A_2w_1^2 \cos(w_1t + \theta_1) \cos(w_2t + \theta_2) \\ &+ A_1A_2w_2^2 \cos(w_1t + \theta_1) \cos(w_2t + \theta_2) \\ &= A_1A_2(2w_1w_2 \sin(w_1t + \theta_1) \sin(w_2t + \theta_2) \\ &+ A_1A_2(w_1^2 + w_2^2) \cos(w_1t + \theta_1) \cos(w_2t + \theta_2)) \end{aligned} \quad (8)$$

위 식을 산술/기하 평균 부등식에 의해서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} w_1^2 + w_2^2 &\geq 2w_1w_2 \quad (\text{등호는 } w_1 = w_2 \text{ 일 경우 성립}) \\ \Psi_{cross}[v_1, v_2] &= 2A_1A_2w_1w_2 \cos(\theta_1 - \theta_2 + (w_1 - w_2)t) \end{aligned} \quad (9)$$

자동 동기화 장치에서 위상의 측정 및 조정은 마지막 과정에서 이루어지기 때문에 이전에 주파수에 대한 동기화가 진행되었다고 가정할 수 있다. 즉,  $w_1 = w_2$ 이므로 아래 식 (10)처럼 정리된다.

$$\Psi_{cross}[v_1, v_2] = 2A_1A_2w_1w_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (10)$$

TEO 정의에 의해서 두 전압신호의 위상차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi(v_1) &= A_1^2w_1^2, \Psi(v_2) = A_2^2w_2^2 \\ \cos(\theta_1 - \theta_2) &= \frac{\Psi_{cross}[v_1, v_2]}{2\sqrt{A_1^2w_1^2A_2^2w_2^2}} = \frac{\Psi_{cross}[v_1, v_2]}{2\sqrt{\Psi(v_1)\Psi(v_2)}} \\ \theta_1 - \theta_2 &= \cos^{-1}\left(\frac{\Psi_{cross}[v_1, v_2]}{2\sqrt{\Psi(v_1)\Psi(v_2)}}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

### 3. 자동동기화장치에서 TEO를 이용한 측정

#### 3.1 DESA 알고리즘의 선택

TEO를 활용한 주파수 및 크기의 측정은 DESA-1, DESA-1a,

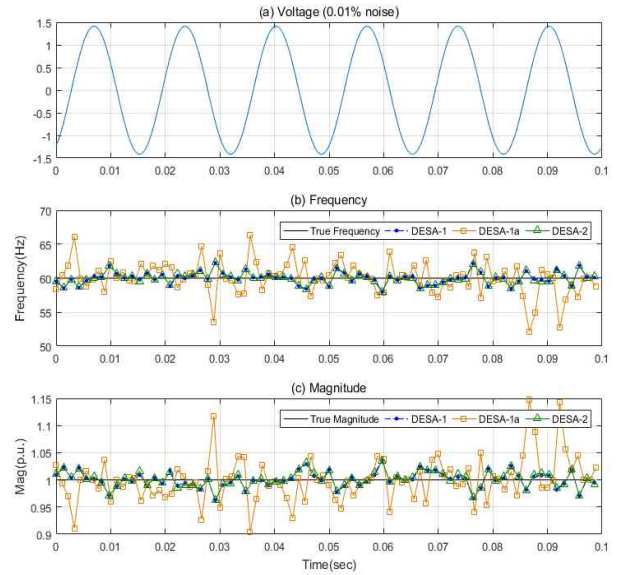


그림 1 DESA 기법에 따른 노이즈 신호(0.01%)에 대한 측정 결과  
Fig. 1 Measurement result of noise signal(0.01%) based on DESA

DESA-2와 같은 DESA 측정 알고리즘을 통해 이루어진다. 각각의 DESA 측정 알고리즘은 샘플 개수, 외란에 대한 정확도의 차이가 존재하기 때문에 시뮬레이션을 통해 최적 기법의 선택이 필요하다. 그림 1은 0.01% 노이즈가 포함된 60Hz 정현파 신호에서 각 DESA를 활용한 주파수 및 크기의 측정결과를 나타낸다.

(a)는 0.01%노이즈가 포함된 전압신호를 나타내며, (b)는 각 DESA를 활용하여 측정한 주파수 결과, (c)는 크기 측정 결과를 나타낸다. 이상적인 파형에 대해서는 모든 DESA 측정 알고리즘이 정확한 값을 가지지만 그림 1과 같이 노이즈가 포함된 신호에서는 오차가 발생하며, DESA 기법에 따라 오차의 정도가 다르게 발생한다. 입력 값을 의미하는 주파수 60Hz와 크기 1p.u.을 기준과의 비교를 통해 외란에 대한 DESA 별 정확도를 확인할 수 있다.

그림 1에서 확인할 수 있듯이 DESA-1a는 다른 측정 기법과 비교하여 오차가 크며, DESA-1과 DESA-2는 유사한 측정 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다. 보다 정확한 정확도를 확인하기 위해 각 기법에 대한 0.1초 동안 측정된 결과의 평균 오차율은 표 3과 같다. 표 3에 따르면 DESA-1a가 크기, 주파수 모두 가장 큰 평균 오차율을 가지며, DESA-1가 가장 작은 오차율을 가지는 것을 확인하였다. 따라서 노이즈 신호에 대해 DESA-1 측정 알고리즘에 가장 작은 오차를 가지므로 본 논문에서는 DESA-1을 사용하였다.

#### 3.2 TEO를 활용한 동기화 시뮬레이션

자동 동기화 장치에서 TEO&DESA를 이용한 파라미터 측정을 확인하기 위해 matlab을 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. DESA-1 기법을 사용했으며, 주파수, 크기, 위상 순으로 진행되는

**표 3** 0.01% 노이즈 신호에서 DESA 측정 기법에 따른 평균 오차율

**Table 3** Average error rate according to DESA measurement technique in 0.01% noise signal

측정 기법	평균 오차율(%)	
	크기	주파수
DESA-1	1.08	1.07
DESA-1a	3.05	3.09
DESA-2	1.14	1.08

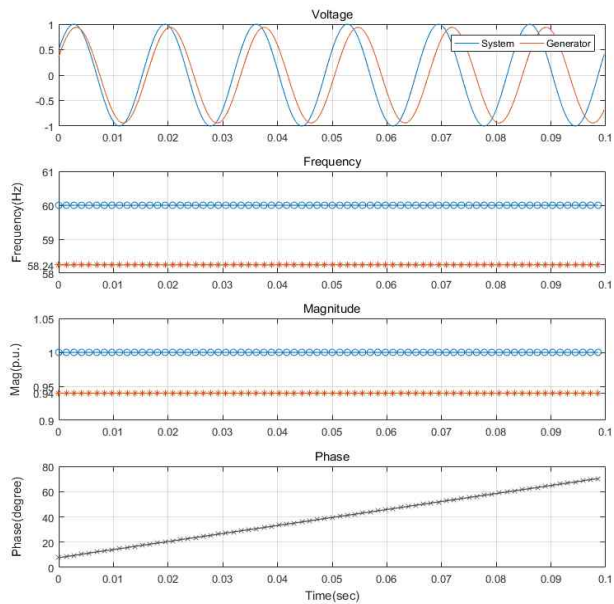
동기화 과정과 유사한 시뮬레이션을 위해서 총 2가지 상황에 대하여 진행하였다. 첫째, 출력 조정 이전에 초기 전압 신호에 대한 측정과 두 번째로 특정 시간에 주파수 동기화를 통해 동일한 주파수에 도달 한 후 크기 동기화가 진행될 때 각 파라미터의 측정값을 확인하였다. 위상의 경우 차단기의 병입 시간, 신호 전송 시간, 동기화 주파수에 따라 투입 시간을 조정하여 동기화를 실시하기 때문에 위상차가 0°로 수렴하는 과정은 확인할 필요 없다.

구현한 TEO&DESA 알고리즘의 샘플링 주파수는 3600Hz (60sample/cycle)으로 설정하였으며, 발전기 및 계통의 전압 신호는 아래 식 (12)와 같이 표현하였다.

$$V_s = A_s \sin(2\pi f_s t + \theta_s) \tag{12}$$

$$V_g = A_g \sin(2\pi f_g t + \theta_g)$$

$V_s$ 는 계통 전압,  $V_g$ 는 병입 발전기를 나타내며, A는 전압의 크기, f는 전압의 주파수,  $\theta$ 는 위상을 의미한다. 이 때, 계통 전압



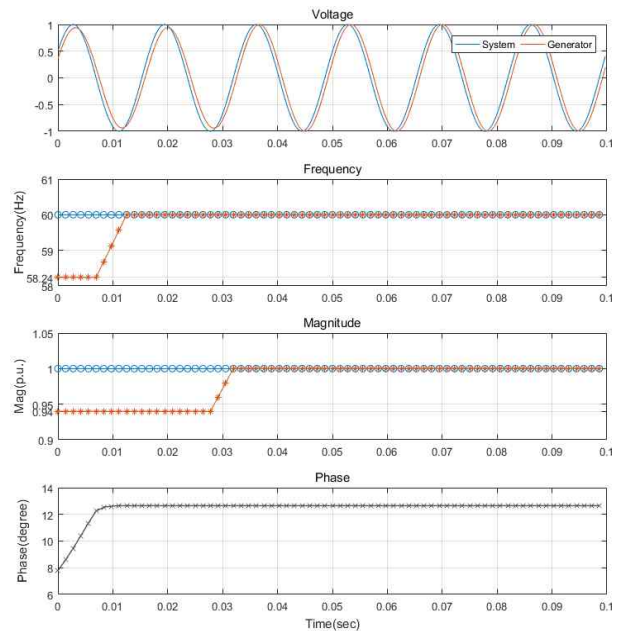
**그림 2** 출력 조정 이전의 계통 및 발전기 신호에 대한 측정 결과  
**Fig. 2** Measurement result for system and generator signals before output adjustment

에서  $A_s = 1\text{p.u.}$ ,  $f_s = 60\text{Hz}$ ,  $\theta_s = 30^\circ$ 로 가정한다. 또한 측정 초기 발전기의 전압은 임의로  $A_g = 0.94\text{p.u.}$ ,  $f_g = 58.24\text{Hz}$ ,  $\theta_g = 22.5^\circ$ 로 가정하였다.

그림 2는 초기 설정 값들을 유지할 경우 각 파라미터의 측정 결과를 의미한다. 측정값 모두 지연없이 첫 측정값부터 정확한 측정이 가능하며, 위상의 경우 주파수 차에 의해 점차적으로 증가함을 확인할 수 있다.

발전기 동기화 시 초기 측정값은 발전기, 병입 계통 모두 기준 파라미터 값들과 다른 값을 가진다. 일반적으로 DFT와 같은 주파수 영역을 이용한 주파수 측정의 경우 변환에 사용되는 기준 주파수와 측정 주파수가 다를 경우 오차가 발생한다. 따라서 반복 연산을 통해서 기준 주파수를 변경하지만 누설 성분으로 인한 오차로 수렴하는데 시간이 발생한다. 따라서 실제 값으로 수렴하는데 지연시간이 발생하거나 하나의 측정값을 위한 연산횟수가 증가한다. 하지만 그림 2와 같이 TEO&DESA는 초기 측정값에 대해서 반복 연산 또는 지연 없이 정확한 측정이 가능하다. 또한 한주기 이상의 측정 시간이 필요한 주파수 영역 기반의 측정방법과 달리 표 2와 식 (4)처럼 5개의 샘플을 사용하여 계산되므로, 3600Hz 기준 약 1.39msec 마다 정확한 측정값을 취득할 수 있다.

두 번째 시뮬레이션은 그림 3과 같이 실시하였으며, 동기화 순서에 따라 약 8msec에 주파수 동기화 진행 후 약 20msec에 크기 동기화가 진행 될 때의 측정 결과를 의미한다. 측정 결과에 따르면 주파수가 조정되는 과정에서 크기 및 위상의 측정값의 변동이 존재하지 않으며, 크기에 대해서도 다른 파라미터에 영향을 미치지 않는다. 위상의 경우 주파수 동기화 과정에서 계통 주파수와 유사한 값을 가질수록 변화량이 감소하여 동기화 시 값이



**그림 3** 동기화 과정에 따른 계통 및 발전기 신호에 대한 측정 결과

**Fig. 3** Measurement result of system and generator signals according to the synchronization process

유지되는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 사용되는 주파수 영역에서의 측정 방법은 측정 주파수에 의존적이므로, 주파수의 변화는 기준주파수와와의 차이의 변화를 유발한다. 즉, 누설성분의 발생으로 크기 및 위상의 측정값에 영향을 미친다. 따라서 주파수 조정 시 크기 및 위상의 정확한 측정이 불가능하다. 하지만 TEO& DESA는 그림 3의 시뮬레이션 결과처럼 측정에 있어서 주파수 특성에 영향을 받지 않기 때문에 각 파라미터의 변화에도 다른 파라미터의 정확한 측정이 가능하다.

#### 4. 개선된 TEO 알고리즘

자동 동기화 장치에서 기존에 사용하는 측정방법에 비해 TEO&DESA를 이용한 파라미터 측정은 매우 빠른 측정 속도를 얻을 수 있다. 대부분 최소 한 주기의 측정시간이 필요한 주파수 기반의 측정 방법들과 다르게 샘플 5개를 사용하여 측정이 가능하다. 따라서 TEO&DESA를 이용한 측정은 자동 동기화 장치 측정 알고리즘의 신속성을 확보할 수 있다. 하지만 그림 4처럼 TEO&DESA는 이상적인 형태의 파형에 대해서는 정확한 측정이 가능하지만 순간적인 파라미터의 측정방법으로서 외란에 취약하다. 자동동기화 장치는 ADC(Analog to Digital Converter) 등 하드웨어 특성으로 인해 완전히 이상적인 파형이 아닌 노이즈 등 외란의 발생이 불가피 하기 때문에 정확성을 높이기 위해서는 알고리즘의 개선이 필수적이다.

##### 4.1 대역 통과 필터의 설계

TEO의 외란에 대한 취약성을 보완하기 위한 방법으로 노이즈 제거 목적의 디지털 필터 사용이 가능하다. 디지털 필터의 경우

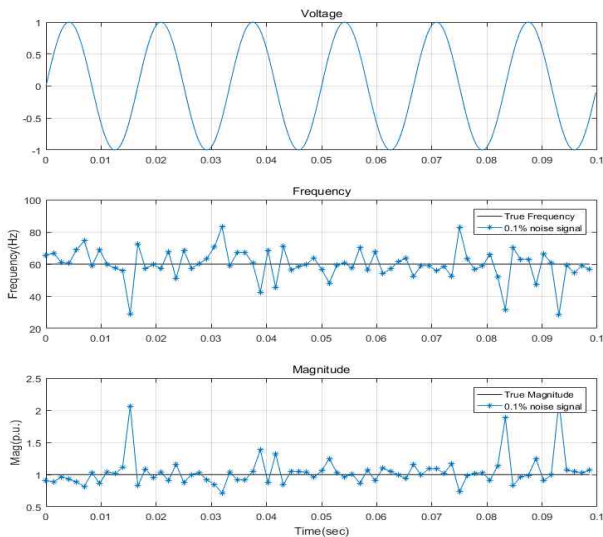


그림 4 0.1% 노이즈가 포함된 전압 신호의 측정값  
Fig. 4 Measurement result of the voltage signal with noise (0.1%)

형태, 설계 방법, 차단 주파수, 필터 차수 등 필터의 목적에 따라 각각 설정이 필요하다. 필터의 형태에는 저대역 통과 필터 (Lowpass filter), 고대역 통과 필터(Highpass filter), 대역통과 필터(Bandpass filter), 대역 소거 필터(Bandstop filter) 등으로 분류되며, 설계 방법은 응답 특성에 따라 IIR(Infinite impulse response), FIR(Finite impulse response)으로 구별된다. 차단 주파수는 필터의 목적에 따라서 설정되며, 차수는 높을수록 지연시간이 길어지지만 이상적인 필터 형태와 유사한 출력을 얻을 수 있다. 외란 제거를 위한 필터는 일반적으로 저대역 통과필터 또는 대역 통과 필터가 사용된다.

TEO는 외란에 취약하기 때문에 저대역 통과 필터 사용 시 저주파 대역에 대한 노이즈에 의해서 오차가 발생할 가능성이 존재한다. 또한 입력 신호의 주파수 성분에서 동일한 크기 값을 유지하기 위해서는 매우 높은 차수를 필요로 하지만, 차수는 측정의 지연으로 나타나기 때문에 높은 차수의 사용에 어려움이 존재한다. 따라서 특정 주파수 성분의 원 신호를 얻을 수 있는 대역 통과 필터의 사용이 효과적이다.

필터의 설계 방법은 차수 및 저지대역 리플의 감소를 위해 IIR 필터의 적용이 효율적이다. 따라서 본 논문에서는 자동동기화장치에 적용하기 위한 필터를 측정 주파수 성분에 대한 IIR 특성으로 설계된 대역 통과 필터를 사용하였으며, 최소한의 지연을 얻기 위해 2차 필터를 설계하였다.

설계된 필터의 구조는 아래 그림 5와 같으며, r은 대역폭 결정계수,  $w_p(n)$ 은 중앙 주파수(center frequency)를 의미한다[20].

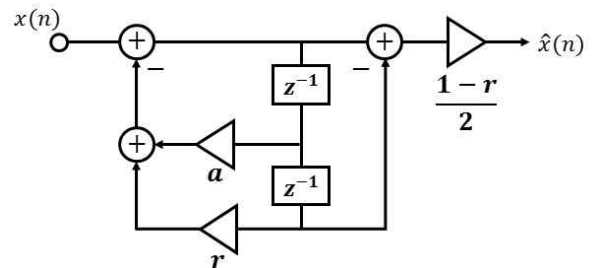


그림 5 대역 통과 필터 구조  
Fig. 5 Bandpass Filter structure

이 때, 이전 연산에 측정된 주파수를 이용하여 필터 계수를 설정하여 정확한 필터를 설계해 측정 정확도를 향상시킬 수 있다. 사용된 필터의 전달함수는 아래 식 (13)과 같으며, 직전에 측정된 주파수를 사용하여 필터 계수를 조정한다.

$$H(z) = \frac{1-r}{2} \frac{1-z^{-2}}{1+a(n)z^{-1}+rz^{-2}} \quad (13)$$

$$a(n) = -(1+r)\cos(w_p(n-1))$$

설계된 대역통과 필터의 주파수 응답은 그림 6와 같으며, 중앙 주파수는 직전 측정 주파수로 설정된다. 또한 r은 0에서 1사이의 값으로 결정되어 1에 가까울수록 아래 그림과 같이 대역폭이 감소한다. 하지만 1에 매우 가까울 경우 중앙 주파수의 크기의 오

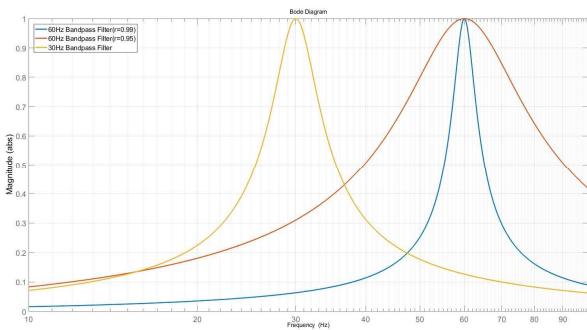


그림 6 대역 통과 필터의 계수에 따른 주파수 응답  
 Fig. 6 Frequency response according to the coefficient of the bandpass filter

차가 발생하기 때문에 본 논문에서는  $r = 0.99$  값을 사용하였다.

#### 4.2 측정 샘플 주기

TEO&DESA를 이용한 파라미터 측정은 위 2장에서 설명했던 바와 같이 5개의 연속된 샘플을 사용하여 측정이 가능하다. 하지만 노이즈 등 외란이 포함된 경우 오차가 발생한다. 이 때, 측정 샘플들의 간격을 증가시키므로 다운샘플링(Down sampling)과 유사한 원리를 통해 높은 정확도를 얻을 수 있다. 샘플 간격( $d_n$ )을 통해 아래 수식과 같이 TEO를 다시 표현할 수 있다. 예를 들어 기존에 정의된 TEO는 연속적인 샘플,  $d_n = 1$  일 때를 의미하며  $d_n$ 이 증가 할수록 사용하는 샘플의 간격이 증가한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(n) &= x(n+1) - x(n) & (14) \\ &\Downarrow \\ \dot{x}(n) &= x(n+d_n) - x(n) \\ \Psi(x(n)) &= (x(n)^2 - x(n-1)x(n+1))/T^2 \\ &\Downarrow \\ \Psi(x(n)) &= (x(n)^2 - x(n-d_n)x(n+d_n))/T^2 \end{aligned}$$

그림 7은 전압 신호에 포함된 노이즈 비율에 따른 TEO&DESA 크기 측정값의 RMSE(Root Mean Squared Error)를 나타낸다. 최소 샘플간격  $d_n = 1$ 부터 60sample/cycle 샘플링 주파수 기준 샘플 60개(1cycle)의 측정 주기를 가지는  $d_n = 12$ 까지 결과를 확인하였다. 그림 7과 같이 샘플 간격의 증가는 측정 주기의 증가를 야기하지만 정확도가 상승함을 확인할 수 있다.

주파수 또는 위상의 측정 결과도 동일하게 샘플간격의 증가에 따라 오차가 감소한다. 또한 RSME 계산결과를 통해 동기화의 크기 기준(5%) 내의 오차를 가지기 위한 최소 샘플 간격도 확인할 수 있다.

TEO&DESA를 이용한 파라미터 측정은 외란에 취약하다는 단점이 존재하기 때문에 측정값의 신뢰성을 높이기 위해 알고리즘의 개선이 필요하다. 표 4는 노이즈 0.1%가 포함된 신호에 대해 기존 TEO&DESA 측정 결과와 개선된 알고리즘의 오차를 나타낸다. 개선된 알고리즘에서 디지털 필터는 샘플 2개의 지연이 발생하고, 샘플간격의 조정은  $d_n = 6$  기준 30개의 샘플로 측정 주기가 증가한다. 하지만 기존 한주기 이상이 필요한 측정 알고리즘

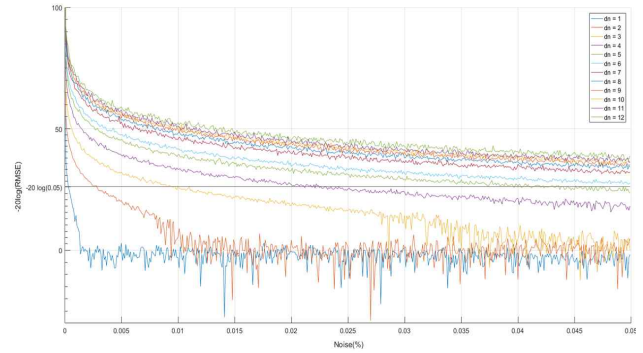


그림 7 노이즈에 따른 크기 측정값의 RMSE  
 Fig. 7 The RMSE of the measuring voltage magnitude according to noise

표 4 노이즈(0.1%) 신호에 대한 개선된 알고리즘 측정값의 RMSE

Table 4 The RMSE of improved algorithm's measurements according to noise(0.1%)

RMSE	Only TEO & DESA ( $d_n = 1$ )	TEO & DESA with BPF ( $d_n = 1$ )	TEO & DESA ( $d_n = 6$ )	TEO & DESA with BPF ( $d_n = 6$ )
크기	0.2859	0.0017	8.4e-4	1.9e-4
주파수	8.9159	0.1497	0.0151	8.8e-4

들과 비교하여 충분히 빠르며, 정확도를 향상시킬 수 있다.

#### 5. 결 론

계통에 발전기의 원활한 병입을 위해서는 자동 동기화 장치 사용이 필수적이다. 이 때, 자동 동기화 장치에서 두 전압 신호의 크기, 주파수, 위상의 측정은 높은 정확도와 빠른 측정 속도가 필수적이기 때문에 적절한 측정 알고리즘의 선택이 중요하다. 기존에 출시되어 계속적으로 사용되는 장치들의 측정 방법은 측정 주기, 속도, 지연 등으로 자동 동기화 장치에 적합하지 않다. 본 논문에서는 자동동기화 장치의 개발 이전에 적합한 측정 알고리즘의 선정 및 검증에 위해 TEO&DESA 기법을 제시하고, matlab을 활용하여 시뮬레이션하였다. 자동 동기화 장치에서의 TEO&DESA 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 동기화 순서에 따른 matlab 시뮬레이션을 실시하였으며, 기존의 다른 측정방법과 비교했을 때 보다 효과적인 측정이 가능함을 확인하였다. 마지막으로 제시한 TEO&DESA는 외란에 의한 오차가 발생하기 때문에 대역 통과 필터, 샘플간격을 이용한 개선된 TEO&DESA를 제시하였다. 측정 결과에 따르면 기존 알고리즘에서 주파수 측정 RMSE는 8.9159의 값을 가지지만 개선된 알고리즘은 8.8e-4로 정확도가 향상됨을 확인하였다. 따라서 자동동기화 장치의 측정알고리즘으로서 개선된 TEO&DESA의 사용은 외란에 대한 강한 내구력, 빠른 측정 속도, 높은 정확도로 전압, 주파수, 위상의 측정이 가능할 것으로 예상된다.

**감사의 글**

본 연구는 민관 공동투자 기술개발 사업 중 한국 동서발전(주)의 연구비 지원(과제명: 200MW급 발전소 기능 통합형 발전기 제어시스템 개발 및 성능개선)을 받아 수행되었습니다(No.S2356912).

**References**

- [1] Michael J. Thompson, "Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems", *65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pp. 203-214, April 2012.
- [2] Ahmad I. Abo Dabowsa, "Design of an Automatic Synchronizing Device for Dual-Electrical Generators Based on CAN Protocol", *The Islamic University of Gaza*, pp. 9-17, June 2011.
- [3] Bindeshwar Singh, N.K. Sharma, A.N. Tiwari, K.S. Verma, S.N. Singh, "Applications of phasor measurement units (PMUs) in electric power system networks incorporated with FACTS controllers", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 64-82, April 2011.
- [4] Maohai Wang and Yuanzhang sun, "A Practical, Precise Method for Frequency Tracking and Phasor Estimation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1547-552, Oct 2004.
- [5] IEC61000-4-30, "Electromagnetic compatibility(EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques-Power quality measurement methods", *IEC*, Oct 2008.
- [6] IEEE Std C50.12, "IEEE Standard for Salient-Pole 50Hz and 60Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5MVA and Above", *IEEE*, 2010.
- [7] Fang Xu, "Algorithm to Remove Spectral Leakage, Close-in Noise, and Its Application to Converter Test", *Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, pp. 1038-1042, April 2006.
- [8] Gregorio Andria, Mario Savino and Amerigo Trotta, "Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 4, pp. 856-863, Aug 1989.
- [9] D. Agrez, "Frequency Estimation by IDFT and Quantization Noise", *16th IMEKO*, vol. IX, pp. 9-14, Sept 1986.
- [10] Iganacio Santamaria, Carlos Pantaleon and Jesus Ibanez, "A Comparative Study of High-Accuracy Frequency Estimation Methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, no. 5, pp. 819-834, 2000.
- [11] Soon-Ryul Nam, Sang-Hee Kang, Jong-Keun Park, "An algorithm for Power Frequency Estimation Using the Difference between the Gains of Cosine and Sine Filters", *KIEE Trans*, vol. 55A, no. 6, pp. 249-254, Jun 2006.
- [12] Milos Sedlacek, Michal Krumpholc, "Digital Measurement of Phase Difference - A Comparative Study of Dsp Algorithms", *Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering CZ-166 27 Czech Republic*, vol. 9, no. 4, pp. 665-666, Jan 2005.
- [13] Shen Ting-ao, Li Hua-nan, Zhang Qi-xin, Li Ming, "A Novel Adaptive Frequency Estimation Algorithm Based on Interpolation FFT and Improved Adaptive Notch Filter", *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW*, no. 1, pp. 48-52, 2017.
- [14] Je-Ho Yoo, Seung-Kwon Shin, Jong-young Park, Soo-Hwan cho, "Advanced Railway Power Quality Detecting Algorithm Using a Combined TEO and SIFT Method", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, pp. 2442-2447, Nov 2015.
- [15] Soo-Hwan Cho, Jeong-Uk Kim, Il-Yop Chung, Jong-Hoon Han, "Determination of Power-Quality Disturbances Using Teager Energy Operator and Kalman Filter Algorithms", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, pp. 42-46, Mar 2012.
- [16] Soo-Hwan Cho, Jin Hur, Il-Yop Chung, "An Applicability of Teager Energy Operator and Energy separation Algorithm for Waveform Distortion Analysis : Harmonics, Inter-harmonics and Frequency Variation", *J Electr Eng Technol*, vol. 9, pp. 742-748, 2014.
- [17] HAL, "AM-FM Signal Analysis by Teager Huang Transform: Application to underwater acoustics", Apr 2013.
- [18] David A. Kaiser and James F. Kaiser, "Estimation of Power Systems Amplitudes, Frequency, and Phase Characteristics using Energy Operators", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 930-937, Sept 2012.
- [19] E. Kvedalen, "Signal processing using the Teager energy operator and other nonlinear operators", *Ph.D. Dissertation Department of Informatics, University of Oslo, May 2003*.
- [20] Yosuke SUGIURA, Keisuke USUKURA, Naoyuki AIKAWA, "Instantaneous Frequency Estimation for a Sinusoidal Signal Combining DESA-2 and Notch Filter", *23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 2676-2680, 2015.

## 저 자 소 개



### 신 훈 철 (Hoon-Chul Shin)

1993년 2월 22일생. 2017년도 상명대학교 에너지그리드학과 졸업(공학사). 2017~현재 상명대학교 에너지그리드학과 재학(석사과정).  
E-mail : gnsjftls@naver.com



### 한 수 경 (Soo-Kyeong Han)

1994년 11월 1일생. 2017년도 상명대학교 에너지그리드학과 졸업(공학사). 2017~2018년 상명대학교 에너지그리드학과 재학(석사과정). 2018~현재 전력거래소 신시장개발처 기후신재생전략팀 재직  
E-mail : skh94@kpx.or.kr



### 유 준 수 (Joon-Soo Lyu)

1982년 7월 2일생. 2008년도 세명대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 2017~2018년 상명대학교 에너지그리드학과 재학(석사과정). 2007~현재 ㈜이투에스 개발팀 재직  
E-mail : lyujoonsoo@naver.com



### 조 수 환 (Soo-Hwan Cho)

1976년 10월 28일생. 2002년 고려대학교전기공학과 졸업(공학사). 2002~2004년 삼성전자 무선사업부 근무. 2009년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2009~2011년 한국원자력연구원 선임연구원. 2011~2017년 상명대학교 에너지그리드학과 조교수, 2017~현재 상명대학교 전기공학과 부교수.  
Tel : 02-781-7503  
E-mail : shcho@smu.ac.kr