

# 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기속도 및 회전각 검출

최정수\*, 조규민\*\*, 신재화\*\*\*  
인하대학교\*, 유한전문대학\*\*, 인천전문대학\*\*\*

## Motor Speed and Phase Angle Detection Using A Sinusoidal AC Tacho-Generator

Jung-Soo Choi\*, Kyu-Min Cho\*\*, Jae-Hwa Shin\*\*\*  
Inha Univ.\* , Yuhan Junior College\*\*, Junior College of Incheon\*\*\*

### Abstract

This paper presents motor speed and phase angle detection method using a sinusoidal AC tachogenerator. The 2-phase or 3-phase output tachogenerator can be adopted, and its' output voltages must have sinusoidal waveforms. Because the detection algorithm is simple, the proposed method can be implemented with analog devices or microprocessor conveniently. And the proposed method has a very short detection delay time. Especially in the analog implementation, there is no delay time without the settling time of analog devices. With the Experimental results, it is verified that the proposed method can accurately detect the instantaneous motor speed and phase over the wide ranges.

### 1. 서론

최근 고정도의 추정 이론과 고속 디지털 연산소자의 개발로 전동기 제어 분야에 있어 실제값에 가까운 속도 및 위상을 추정할 수 있는 단계에 와 있다. 특히 BLDC 구동에 있어서 속도 검출기 뿐만 아니라 훌센서 등의 자극 검출기를 사용하지 않는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 센서리스 제어는 제어기와 전동기가 원거리에 따로 위치할 경우, 센서의 부착이 어려울 경우, 센서에 의해 검출을 하지만 정도가 낮아 오히려 추정 연산의 경우가 좋은 정도를 가질 경우 등등의 이유가 있을 경우 유용하게 적용될 수 있으나 저속영역에서는 아직도 많은 연구가 필요하다.[1-2]

현재 신뢰성과 경제성의 이유로 실제의 경우는 거의 다 센서를 이용한다. 펄스 엔코더를 이용하는 경우 저속영역에서는 T기법, 고속영역에서는 M기법을 주로 이용하고 있으며 광범위한 속도 영역에서도 좋은 정도를 얻고자 할

경우 M/T기법을 이용한다. 그러나 이들의 속도 검출법들은 검출주기에 비례하는 정도를 같기 때문에 검출주기를 짧게 할 수 없으므로 검출시간 지연에 의한 영향을 보상하기 위하여 순시 속도 예측기법을 적용해야만 한다.[3-5]

한편 펄스엔코더의 출력으로써 전동기의 회전 변위량을 측정할 수는 있으나 자극의 위치나 회전자의 절대 위치 정보는 얻을 수 없기 때문에 이를 위해서는 펄스 엔코더와 훌센서를 함께 이용하든지 페롤버나 절대 엔코더를 사용해야 하는데 좋은 정도의 것은 상당한 고가에 따른다.

본 논문에서는 교류 타코제너레이터의 출력전압으로부터 순시적인 전동기의 속도 및 위상과 연산 알고리즘을 제시하고, 실험을 수행하여 전동기 제어에 유용함을 보이고자 하였다.

### 2. 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 회전각속도 및 회전각 연산

#### 2.1 3상 타코제너레이터를 이용한 속도연산

120도 위상 차를 갖는 3상 타코제너레이터의 상전압의 실효치를  $E$ 라 했을 때 각 상전압은 식 (1)로 표시된다.

$$\begin{aligned} E_U &= \sqrt{2} E \sin \omega t \\ E_V &= \sqrt{2} E \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ E_W &= \sqrt{2} E \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 각 변을 제곱하여 각 변을 더한 후  $E$ 에 대하여 정리하면 식 (2)가 된다.

$$E = \sqrt{\frac{1}{3} (E_U^2 + E_V^2 + E_W^2)} \quad (2)$$

이 때, 3상 타코제너레이터의 정현파 유기기전력의 실효치  $E$ 는 권선계수(winding factor)를  $K_{ll}$ , 회전각속도를  $\omega$ , 권수를  $n$ , 자속을  $\phi$ 라 했을 때 식 (3)으로 표현된다.

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} K_W \omega n \phi \quad (3)$$

식 (3)을  $\omega$ 에 대하여 정리하여 식 (2)를 대입하면 식 (4)가 된다.

$$\omega = K_1 \sqrt{E_U^2 + E_V^2 + E_W^2} \quad (4)$$

$$\text{단, } K_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{K_W n \phi}$$

식 (4)에서  $K_1$ 은 일정한 상수값이 되므로 3상 타코제너레이터의 출력전압의 순시치로부터 전동기의 속도를 연산할 수 있다. 식 (4)를 식 (5)와 같이 변형하면 120도 위상차의 2상 출력만으로도 연산이 가능하며, 3상 2상 변환을 통하여서도 속도 연산이 가능하다.

$$\omega = K_2 \sqrt{E_U^2 + E_V^2 + E_U E_V} \quad (5)$$

$$\text{단, } K_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{K_W n \phi}$$

## 2.2 2상 타코제너레이터를 이용한 속도연산

90도 위상 차를 갖는 2상 타코제너레이터의 상전압의 실효치를  $E$ 라 했을 때 각 상전압은 식 (6)으로 표시된다.

$$E_A = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (6)$$

$$E_B = \sqrt{2} E \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

3상의 경우와 같은 방법으로  $\omega$ 에 대하여 정리하면 식 (7)이 된다.

$$\omega = K_3 \sqrt{E_A^2 + E_B^2} \quad (7)$$

$$\text{단, } K_3 = \frac{1}{K_W n \phi}$$

식 (7)에서도  $K_3$ 은 일정한 값이 되므로 역시 2상 타코제너레이터의 출력전압의 순시치로부터 전동기의 속도를 연산할 수 있다.

식 (4), 식(5), 식(7) 모두 제너레이터의 자속분포가 완전한 정현파일 경우이며, 만일 고조파가 포함되어 있다면 일정속도에서도 맥동이 있는 것으로 나타나게 되므로 이 점에 유의해야 하며, 이를 보상하기 위하여는 각 고조파의 성분의 크기를 Off-Line으로 구한 뒤 별도로 제공되는 위상각에 따라 순시적으로 고조파 성분을 보상해야 한다.

## 2.3 위상 연산

앞에서 기술한 바와 같이 타코제너레이터의 순시치로부터 순시 속도를 연산할 수 있을 뿐만 아니라 순시 위상각 또한 연산이 가능하다. 즉, 식 (1)과 식 (2)를 이용

하여  $\omega t$ 에 대하여 정리하면 식 (8) 또는 식 (9)가 되므로 이 연산을 통하여 위상각을 알 수 있다.

$$\omega t = \sin^{-1} \frac{\sqrt{3} E_U}{\sqrt{E_U^2 + E_V^2 + E_W^2}} \quad (8)$$

$$\omega t = \sin^{-1} \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} E_U}{\sqrt{E_U^2 + E_V^2 + E_U E_V}} \quad (9)$$

또한 90도 위상차의 2상 출력을 이용할 경우에는 식 (10)을 이용하면 된다.

$$\omega t = \sin^{-1} \frac{E_A}{\sqrt{E_A^2 + E_B^2}} \quad (10)$$

식 (8) - (10)의 경우 아크사인 연산에 의존하므로 위상각을  $\theta$ 라하면 그 연산 범위가  $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$  이므로 상

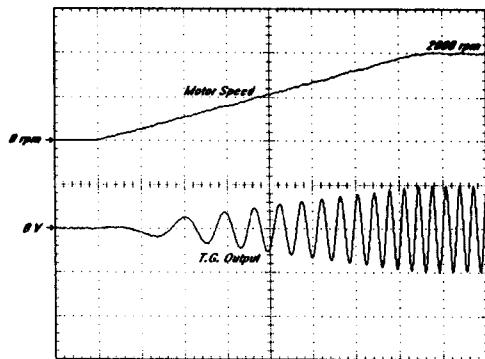
한에 따라 보정을 해야 한다. 또한 전동기가 멈추어 있을 경우에는 타코제너레이터의 각 상전압이 0이므로 위상각 연산이 불가능 함을 알 수 있다. 그러나 미세한 움직임이라도 있게되면 곧바로 위상각의 연산이 가능하므로 BLDC 등의 구동에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 실험결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 회전각속도 및 위상각 연산에 대한 실험을 선형 연산소자를 이용한 경우와 마이크로프로세서를 이용한 디지털 연산의 경우에 대하여 수행하였으며, 성능 평가를 위하여 직류 타코제너레이터의 출력과 비교하였다.

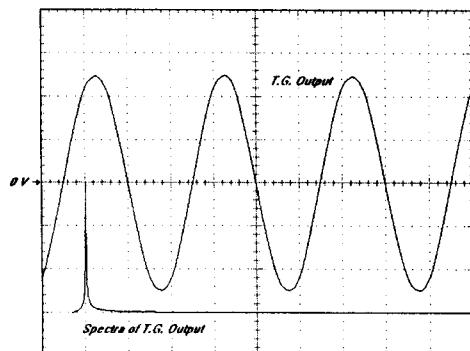
먼저, 그림 1은 전동기 속도를 0[rpm]에서 2000[rpm]으로 직선적으로 증가 시켰을 경우에 대한 전동기 속도 및 정현파 교류 타코제너레이터의 출력파형을 보여주는 것으로, 속도에 비례하여 크기와 주파수가 비례하여 증가함을 알 수 있다. 타코제너레이터의 출력에 고조파 성분이 포함 여부를 확인하기 위하여 2000[rpm] 정속 구동 중의 타코제너레이터 출력파형에 대한 스펙트럼을 분석해 본 결과 완벽한 정현파임을 확인할 수 있었다. 이에 대한 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림 3은 전동기 속도를 0[rpm]에서 2000[rpm] 사이에서 변화를 주었을 경우로 각각 직류 타코제너레이터의 출력, 디지털 속도 연산 결과 및 선형 속도 연산의 결과이다. 디지털 속도 연산은 교류 타코제너레이터의 출력을 정도 16[bit]의 A/D변환 후 DSP로 연산한 결과를 다시 정도 12[bit]의 D/A변환하여 관측하였다. 이 경우 속도 검출능력은 최고검출속도 2200[rpm], 속도분해능 약 0.007[rpm]



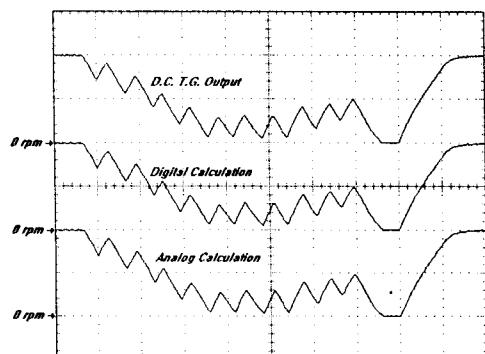
1000[rpm/div], 5[V]/div, 50[msec]/div

그림 1 전동기 속도 변화에 따른  
정현파 교류 타코제네레이터의 출력파형



2[V]/div, 200[Hz]/div, 5[msec]/div

그림 2 교류 타코제네레이터 출력파형 및 스펙트럼

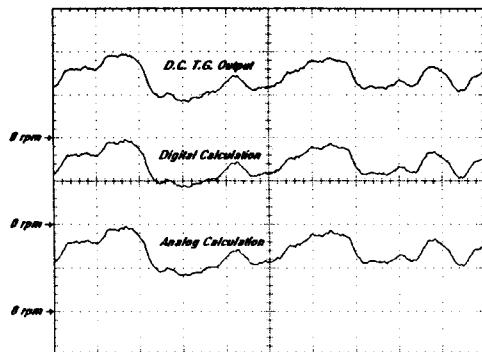


1000[rpm/div], 200[msec]/div

그림 3 전동기 속도 연산결과 1

이며, 총 연산소요시간을 5[usec]로 한 경우이다. 선형 연산은 최대오차 0.5[%]의 확도를 가진 AD사의 AD534KD를 이용한 경우로 디지털 연산에 비하여 큰 오차를 가질 수 있으나 연산에 시간이 거의 걸리지 않는다는 장점이

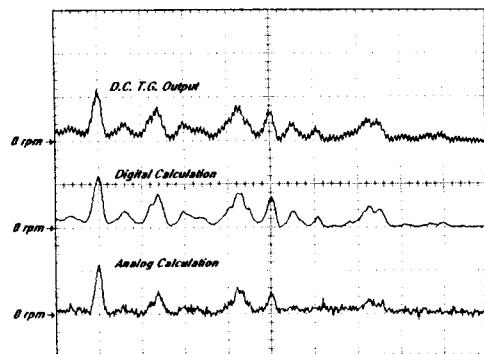
있다. 오실로스코우프의 관측결과는 어느 것인든 속도 검출능력의 차이를 발견할 수 없었다. 그림 4는 그림 3의 경우와 같은 조건하에서 전동기 속도를 200[rpm]이하에서 미세 변화를 주었을 경우에 대한 속도 파형이다. 시간지연이나 속도의 오차가 역시 육안으로는 구분하기 힘들다.



100[rpm/div], 200[msec]/div

그림 4 전동기 속도 연산결과 2

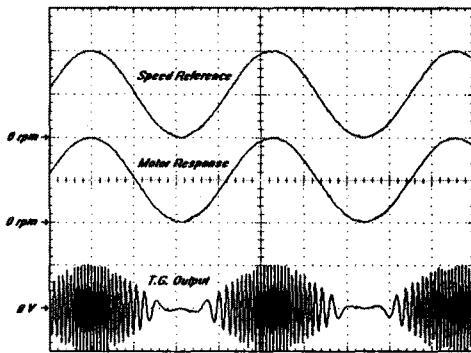
그림 5는 2[rpm]이하의 속도에 대한 검출 결과로, 이경우에는 최고검출속도 220[rpm], 속도분해능 약 0.0067[rpm]의 정도로 연산한 결과이다. 선형 연산의 경우 최대한의 오프셋 조정 및 이득조정을 하였음에도 불구하고 낮은 속도에서 다소의 오차를 가짐을 알 수 있었으나, 이는 사용 연산소자의 오차 범위에 비하여는 그나마 좋은 결과였다.



2[rpm/div], 200[msec]/div

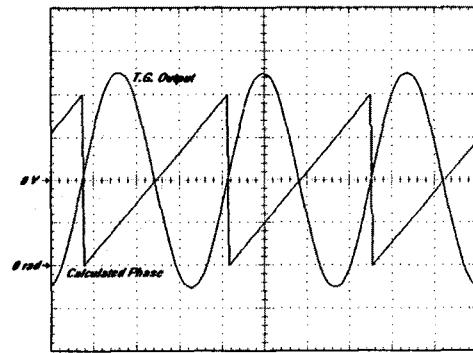
그림 5 전동기 속도 연산결과 3

그림 6과 그림 7은 제안한 속도 연산을 적용, 직류전동기의 속도제어를 행한 결과이다. 그림 6은 전동기의 속도를 0[rpm]에서 2000[rpm] 사이에서 정현파 모양으로 지령한 경우이며, 그림 7은 계단 모양으로 지령한 경우이다.



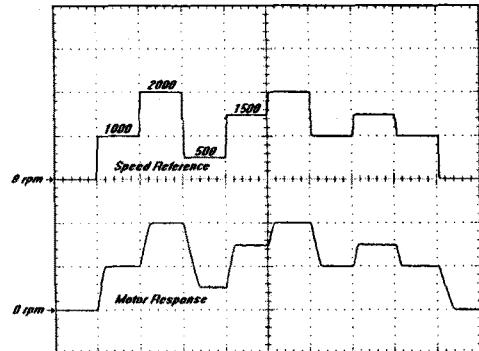
1000[rpm/div], 200[msec/div]

그림 6 전동기 속도 제어 결과 1



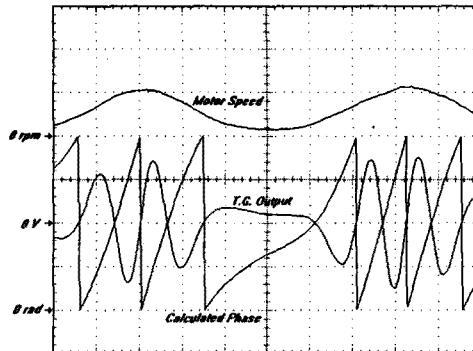
1[V/div, π/2[rad/div], 10[msec/div]

그림 8 위상각 연산결과 1



1000[rpm/div], 500[msec/div]

그림 7 전동기 속도 제어 결과 2



500[rpm/div, 1[V/div, π/2[rad/div], 50[msec/div]

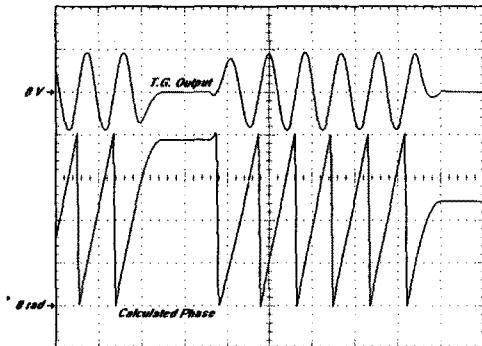
그림 9 위상각 연산결과 2

이 때 속도 연산은 12[bit] A/D변환 후 디지털 연산을 행하였으며 정도는 최고검출속도 2200[rpm], 속도분해능 0.67[rpm]의 경우로, 실제 실험은 DSP로 행하였으나 16[bit]급 마이크로프로세서를 이용하는 경우를 가정하여 속도 연산 및 전동기 제어 주기를 50[μsec]로 실험을 행한 결과 이다.

그림 8과 그림 9는 위상각 연산의 결과를 나타내는 것으로 각각 2000[rpm] 정속시와 속도 가변시의 결과이다. 앞에서 언급한 바와 같이 식 (8) - (10)의 경우 0속도에서는 연산이 불가능하므로 속도 연산이 0으로 되었을 경우에는 0속도 이전의 위상각의 값을 유지하는 알고리즘을 적용하였으며, 0속도 발생 상황에 대한 실험 결과를 그림 10에 나타내었다.

#### 1. 결론

본 논문에서는 고조파가 포함되지 않은 정현파 교류 타코제네레이터를 이용한 전동기 속도 및 위상각 검출에 대하여 각각의 연산 알고리즘을 제시하고, 실험적인 고찰을



1[V/div, π/2[rad/div], 100[msec/div]

그림 10 위상각 연산결과 3

통하여 제안한 방법의 유용성을 입증하였다. 특히 전동기 제어에 적용한 결과로써 순시속도 예측기법을 적용하지 아니하고도 정확하고 빠른 응답을 얻을 수 있었다. 따라서 고성능의 직류서보 전동기의 광범위한 속도 범위의 급

변속이 요구되는 경우 또는 전동기의 극저속 운전시에 매우 유용할 것으로 판단되며, 단일 센서로 속도와 위치를 검출할 수 있으므로 이 점 또한 장점으로 판단된다.

추후 연구과제로는 교류전동기의 극저속 직접벡터제어에의 적용 및 전동기 위치제어에의 적용에 관한 실험을 행하는 것 등이다.

#### [참고문헌]

[1] K. Fujita et al., "Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for a Servo Systems", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-28 No. 4, pp. 864-872, July/Aug. 1992.

[2] 설승기와 1명, "위치센서없는 PMSM의 고성능 운전을 위한 새로운 제어 방법", 전기학회논문지 Vol. 44, No. 8, pp. 1018 - 1026, 1995.

[3] T. Ohmac et al., "A Microprocessor-Controlled High Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-29 No. 3, pp. 207-211, Aug. 1982.

[4] K. Saito et al., "A Microprocessor-Controlled Speed Regulator with Instantaneous Speed Estimation for Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-35 No. 1, pp. 95-99, 1988

[5] 이석규 외 2인, "서보모터의 고정도 속도검출을 위한 M/T 방식의 하드웨어 구현", 한국자동제어학술회의논문집, pp. 365-369, 1993.

[6] 조규민 외 1인, "3상 타코 제너레이터를 이용한 전동기 속도검출 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 278 - 281, 1995.

본 연구는 유한전문대학의 학술 연구비 지원에 의해 수행되고 있는 연구과제의 일부임을 밝히며, 아울러 학교당국에 감사의 말씀을 전합니다.