

論文97-34S-6-11

# 정현과 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 속도 및 회전각 검출

## (Motor Speed and Revolution Angle Detection Using A Sinusoidal AC Tacho-Generator)

崔正秀\*, 劉完植\*\*, 曹圭珉\*\*\*

(Jung-Soo Choi, Wan-Sik You, and Kyu-Min Cho)

### 요 약

본 논문은 정현과 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 속도 및 회전각 검출에 관한 것이다. 2상 또는 3상 출력의 타코제너레이터가 적용 가능하며, 타코제너레이터의 출력 전압은 반드시 정현파이어야 한다. 검출 알고리즘이 간단하기 때문에 제안한 방법은 선형 소자나 마이크로프로세서를 이용하여 편리하게 구현될 수 있다. 그리고 제안한 방법은 매우 짧은 검출지연시간을 갖는다. 특히 선형 구현에 있어서는 선형 소자들의 정정시간 이외에는 지연시간이 없다. 실험결과로써, 제안한 방법은 광범위한 영역에 걸쳐 순시 전동기 속도 및 회전각을 정확하게 검출할 수 있음을 입증하였다.

### Abstract

This paper presents motor speed and revolution angle detection method using a sinusoidal AC tacho-generator. The 2-phase or 3-phase output tacho-generator 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 revolution angle over the wide ranges.

### 1. 서 론

최근 전동기 구동분야는 고정도의 속도 추정 이론과 고속 디지털 연산소자의 보급에 힘입어 실제속도에 가까운 속도를 추정하기에 이르렀다. 또한 위치센서 없이

도 PMSM을 운전하는 등 센서리스 제어에 관한 연구가 활발하게 이루어 지고 있다. 이와 같은 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 필요하며, 현재로서는 신뢰성과 경제성의 이유로 실제의 경우는 거의 다 센서를 이용한다.<sup>[1,2]</sup>

센서를 이용한 전동기 속도 검출 방법은 엔코더를 이용하는 방법과 타코제너레이터를 이용하는 방법으로 대별 된다. 회전에 따라 펄스열이 발생하는 펄스엔코더를 이용하는 방법은 현재 전동기 속도 제어를 디지털로 행하는 경우 가장 많이 이용되고 있다. 이 때 속도

\* 正會員, 仁荷大學校 電氣工學科

(Dept. of Electrical Eng., Inha University)

\*\* 正會員, 特許廳

(Korean Industrial Property Office)

\*\*\* 正會員, 柳韓專門大學 情報通信科

(Dept. of Information & Telecommunications,  
Yuhan Junior College)

接受日字: 1997年3月6日, 수정완료일: 1997年6月3日

에 비례하는 가변 주파수의 펄스열 정보를 속도 정보로 변환하는 알고리즘은 F/V 콘버터를 이용하는 방법, 일정한 검출 주기 동안에 계수된 엔코더 펄스의 수를 가지고 속도 정보를 얻어내는 M기법, 일정 수의 엔코더 펄스 주기 동안에 계수된 일정 주파수의 클럭 수를 가지고 속도 정보를 얻어내는 T기법, M기법과 T기법을 동시에 이용하는 M/T기법 등이 있다. F/V 콘버터를 이용하는 방법은 원리적으로 R-C 회로를 이용하는 것이므로 응답을 빠르게 하려면 전압크기에 맥동이 발생하게 되어 전동기 제어시 정상상태 특성이 불량하게 되는 문제점이 있으며 근본적으로 속도에 따라 펄스열의 주파수가 바뀌게 되므로 저속에서는 더욱 큰 맥동을 가지고 고속이 되면 응답이 느려지는 문제점이 있어 전동기 속도 제어를 위한 속도 정보로는 적합하지 못하다. M기법 또는 T기법은 현재 가장 널리 사용되는 속도 검출 알고리즘이나 M기법의 경우 저속 영역으로 갈수록 검출 오차가 커지며 어느 한계 이하의 속도에 있어서는 속도 검출 자체가 불가능 하고, T기법의 경우 M기법과는 반대로 고속 영역으로 갈수록 검출 오차가 커지며 어느 한계 이상의 속도에 있어서는 이 또한 속도 검출 자체가 불가능 하게 된다. 또한 M기법과 T기법 모두 디지털 연산기를 이용하게 되는데 회로의 계수 능력에 따라서도 저속 또는 고속의 속도 검출 불가능 영역이 발생하게 되는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 M기법의 경우 속도 검출 정도를 높이기 위하여는 긴 검출 주기가 소요 되므로 당연히 속도 검출 지연이 문제가 되며, T기법의 경우 속도 검출 주기가 가변되는 문제가 발생한다. 최근 전동기의 고성능 제어에는 저속 및 고속 영역 모두에서 좋은 속도 검출 정도를 가지는 M/T기법이 많이 이용되고 있으나 이 M/T기법에 있어서도 속도 검출 지연이 발생함과 동시에 속도 검출 알고리즘의 구현이 복잡한 단점이 있다. 따라서 거의 대부분의 고정도 전동기 제어시에는 속도 검출 지연에 의한 영향을 보상하기 위하여 순시 속도에 예측기법이 적용되고 있으나 이 또한 속도의 변동이 불규칙적으로 급변하는 경우에는 정확한 순시 속도 예측이 불가능하다.<sup>[3-5]</sup>

그리고 타코제너레이터를 이용한 속도 검출 방법의 경우는 단상 교류 타코제너레이터를 이용하는 방법과 직류 타코제너레이터를 이용하는 방법이 있는데 단상 교류 타코제너레이터를 이용하는 방법의 경우는 단상 교류 타코제너레이터의 출력이 속도에 비례하는 크기

와 주파수를 가진 교류 파형이므로 전동기 제어를 위하여 일정한 크기의 속도 정보를 얻기 위하여는 RMS to DC 콘버터를 사용하게 되는데 이 경우는 펄스엔코더를 이용하여 F/V 콘버터를 사용한 경우와 같은 문제점이 발생되므로 실제에 있어서는 교류 전압계를 이용한 속도 표시용으로만 이용되고 있다. 직류 타코제너레이터를 이용하는 경우에는 직류 타코제너레이터의 출력이 속도에 비례하는 직류 전압이므로 활용이 간편하다는 장점이 있으나 브러쉬와 정류자가 있으므로 유지 보수가 필요하다는 문제점이 있으며 브러쉬와 정류자에 의한 정류과정에서 이상전압이 발생하는 단점이 있어 직류 타코제너레이터의 출력을 필터링하여야 되므로 이에 의한 속도 검출 지연이 발생하는 문제점이 있다.

한편 펄스엔코더의 출력으로써 전동기의 회전 변위량을 측정할 수는 있으나 자극의 위치나 회전자의 절대 위치 정보는 얻을 수 없기 때문에 이를 위해서는 펄스 엔코더와 홀 센서를 함께 이용하든지 레졸버나 절대 엔코더를 사용해야 하는데 좋은 정도의 것은 상당한 고가에 이르며 절대 엔코더를 이용할 경우 속도 정보는 마이크로프로세서 등의 디지털 연산기로 위치값을 미분하여 속도를 검출하게 되므로 디지털 연산기가 반드시 필요하며 저속의 경우 미분 주기가 길어야 정도를 높일 수 있으므로 속도 검출 지연 또한 문제가 된다.

본 논문은 정현파 교류 타코제너레이터의 출력을 이용한 전동기 속도 및 회전각 검출에 관한 것으로 90도 위상차를 갖는 2상 타코제너레이터 또는 120도 위상차를 갖는 3상 타코제너레이터의 적용이 가능하다. 어느 경우에도 타코제너레이터의 출력 전압 파형이 완전한 정현파일 경우 적용이 유용한 것으로 단일 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. 그러나 근래 유한요소법을 이용한 전기기기의 해석 및 설계기법의 발달로 완전한 정현파의 출력을 갖는 타코제너레이터의 제작이 가능하므로 본 논문에서 제안하는 방법이 매우 유용할 것으로 판단된다. 특히, 선형 연산 소자 기술이 상당한 수준에 있기 때문에 제안 알고리즘을 선형 연산 소자로서 구현 한다면 속도 검출 시간 지연은 거의 없게

되며, 마이크로프로세서 등을 이용한 디지털 연산의 경우에도 기존의 펄스 엔코더를 이용하는 경우와 달리 속도 검출 주기가 필요치 않으므로 연산시간 이외의 속도 검출 지연 요소는 없다. 또한 연산 오차가 주는 한계 이외에는 다른 검출 속도 범위의 한계는 존재하지 않는다. 따라서 고정도, 고속 응답의 전동기 제어시 매우 유용할 것으로 판단된다.<sup>[6-8]</sup>

본 논문에서는 정현과 교류 타코제너레이터의 출력 전압으로부터 순시적인 전동기의 속도 및 회전각 연산 알고리즘을 제시하고, 현재 널리 이용되고 있는 펄스엔코더를 이용한 속도 검출 방법의 경우와 비교한 모의 실험 및 제시한 알고리즘에 의한 실험을 수행하여 전동기 제어에 유용함을 보이고자 하였다.

## II. 정현과 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 속도 및 회전각 연산

### 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.

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

이 때, 3상 타코제너레이터의 정현과 유기기전력의 실효치  $E$ 는 권선계수(winding factor)를  $K_w$ , 회전각 속도를  $\omega$ , 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.

$$\begin{aligned} \omega &= K_1 \sqrt{E_U^2 + E_V^2 + E_W^2} \\ \text{단, } K_1 &= \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{K_w n \Phi} \end{aligned} \quad (4)$$

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. 2상 타코제너레이터를 이용한 속도연산

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

$$\begin{aligned} E_A &= \sqrt{2} E \sin \omega t \\ E_B &= \sqrt{2} E \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} \omega &= K_3 \sqrt{E_A^2 + E_B^2} \\ \text{단, } K_3 &= \frac{1}{K_w n \Phi} \end{aligned} \quad (7)$$

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

### 3. 회전각 연산

앞에서 기술한 바와 같이 타코제너레이터의 순시치로부터 순시 속도를 연산할 수 있을 뿐만 아니라 순시 회전각 또한 연산이 가능하다. 즉, 식 (1)과 식 (2)를 이용하여  $\omega t$ 에 대하여 정리하면 식 (8) 또는 식 (9)가 되므로 이 연산을 통하여 회전각을 알 수 있다.

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

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

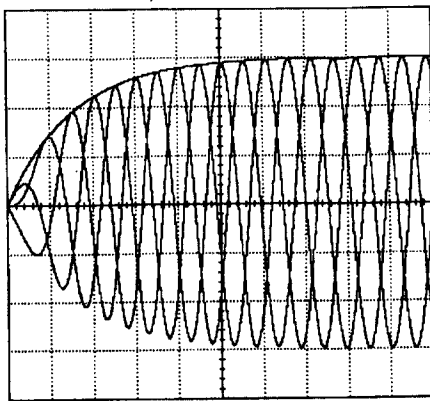
또한 90도 위상차의 2상 출력을 이용할 경우에는 식 (10)을 이용하면 된다.

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

식 (8) - (10)의 경우 아크사인 연산에 의존하므로 회전각을  $\theta$ 라하면 그 연산 범위가  $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$  이므로 상한에 따라 보정을 해야 한다. 또한 전동기가 멈추어 있을 경우에는 타코제너레이터의 각 상전압이 0 이므로 위상각 연산이 불가능함을 알 수 있다. 그러나 미세한 움직임이라도 있게되면 곧바로 회전각의 연산이 가능하며 정지시에는 정지 직전의 회전각을 유지시키는 알고리즘을 적용하면 된다. 따라서 회전각의 연산은 선형소자로의 구현이 곤란하다.

### III. 컴퓨터 모의 실험

본 논문에서 제안한 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 속도 검출 알고리즘에 대한 모의실험을 선형 연산소자를 이용한 경우와 마이크로프로세서를 이용한 디지털 연산의 경우에 대하여 수행하였으며, 비교 평가를 위하여 기존의 펄스엔코더를 이용한 속도 검출방법인 M기법, T기법, M/T기법에 대한 모의실험 역시 실제 구현 알고리즘으로 모의실험을 행하였다. 본 논문에서 제안한 속도 검출 방법의 경우에 있어서는 연산 시간에 있어 3상 타코제너레이터를 이용한 경우와 2상 타코제너레이터를 이용한 경우가 차이가 날 뿐 그 특성은 동일할 것이므로, 연산 소요 시간이 다소 더 걸릴 3상 타코제너레이터를 이용한 경우에 대하여서만 모의 실험을 행하였다.



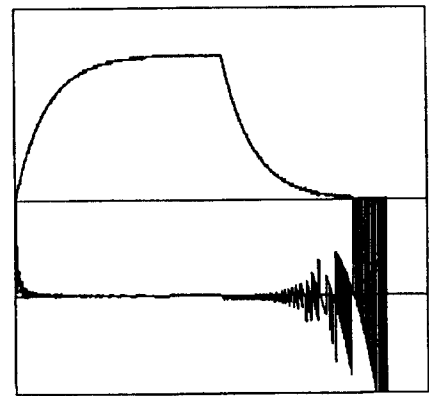
600[rpm]/div , 10[msec]/div

그림 1. 정현파 3상 타코제너레이터 출력파형  
Fig. 1. Output waveforms of 3-phase sinusoidal tachogenerator.

먼저 그림 1은 4극을 가정한 3상 타코제너레이터의

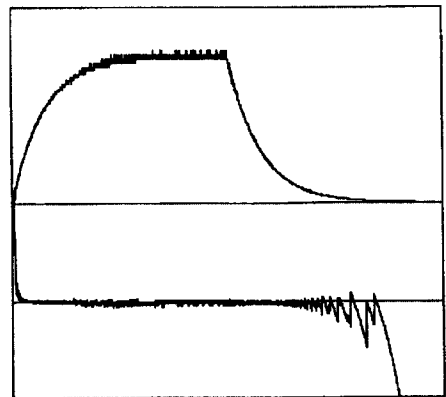
3상 출력파형과 이로 부터 연산된 전동기의 속도를 나타낸 것으로 0에서 1800rpm으로 변화하는 경우를 가정한 것이다. 선형 연산소자를 이용하는 경우 그림 1에서와 같이 시간 지연 없이 순시 속도를 곧바로 연산할 수 있다.

그림 2는 회전당 8000펄스를 발생하는 엔코더를 사용하고 샘플링시간 300μsec로 M기법을 사용하였을 때 실제속도 및 검출속도와 속도의 백분율 오차를 보여주는 것이다. M기법의 단점인, 저속에서 계수할 수 있는 엔코더펄스의 숫자가 작기 때문에 저속에서 다소의 오차를 보이고 있다.



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 2. M기법 모의실험 결과  
Fig. 2. Simulation result using M-method.



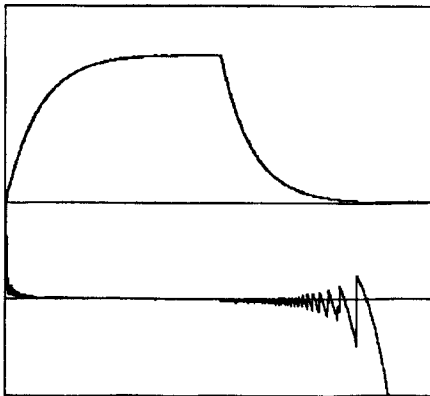
Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 3. T기법 모의실험 결과  
Fig. 3. Simulation result using T-method.

그림 3은 1MHz의 클럭을 이용하고 회전당 1000펄스를 발생하는 엔코더로 T기법을 사용하였을 때 검출

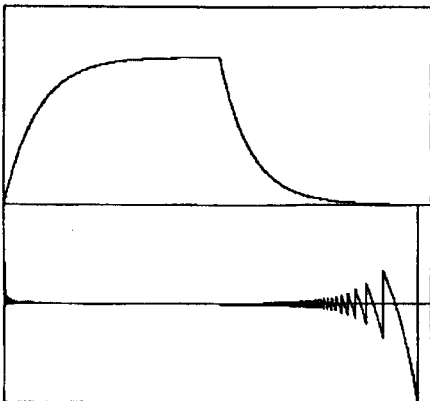
속도와 백분율 오차를 보이고 있다. 고속에서 엔코더펄스 한 주기간에 계수된 클럭펄스의 갯수가 작아서 오차를 보이고 있다. 저속에서도 엔코더펄스의 주파수가 낮아 검출지연이 발생함에 따라 속도오차가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 4는 1MHz의 클럭과 회전당 2000펄스를 발생하는 엔코더를 사용하여 샘플링시간 300μsec로 M/T기법을 사용하였을 때 검출속도와 백분율 오차를 보이고 있다. 고속에서는 안정되나 저속에서 역시 검출주기가 길어짐에 따라서 오차값이 큼을 알 수 있다.



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 4. M/T기법 모의실험 결과  
Fig. 4. Simulation result using M/T-method.



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

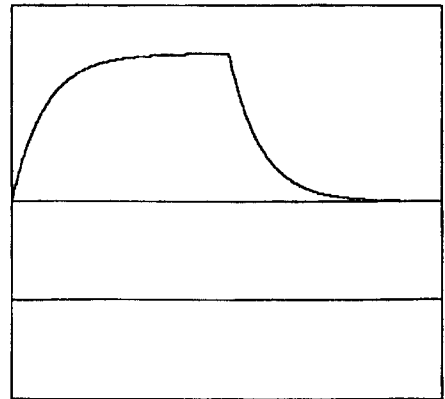
그림 5. 제안방법 선형연산 후 8비트, 100μsec A/D 변환 모의실험 결과  
Fig. 5. Simulation result using proposed method at 8bit, 100μsec A/D conversion after analog calculation.

그림 2, 3, 4에 있어서 엔코더의 펄스수를 각각 다르게 하여 모의실험을 행한 이유는 각각의 속도 검출 방

법의 특성상 전체 속도 영역에 있어 전반적으로 우수한 경우를 보이기 위하여 클럭 주파수와 샘플링시간에 적합한 펄스수를 가정했기 때문이다.

그림 5는 제안한 3상 정현파 타코제너레이터의 출력을 이용, 선형 연산소자로 속도를 계산하고 그 결과를 정도 8bit, 변환시간 100μsec로 A/D변환한 결과이다. M/T기법을 사용한 결과와 비교하였을 때 보다 우수한 성능을 나타내고 있다.

그림 6은 선형 연산회로로 속도를 계산하고 정도 16bit, 변환시간 2μsec로 A/D변환한 결과로 실제속도와 차이가 없음을 알 수 있다.

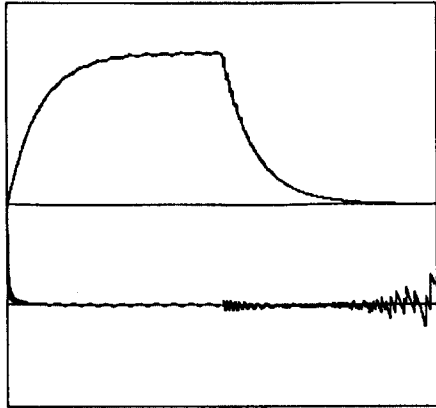


Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 6. 제안방법 선형연산 후 16비트, 2μsec A/D 변환 모의실험 결과  
Fig. 6. Simulation result using proposed method at 16bit, 2μsec A/D conversion after analog calculation.

그림 7은 3상 타코제너레이터의 출력전압을 A/D 변환하고 마이크로프로세서에서 속도를 연산한 결과를 나타낸 것이다. 이는 정도 10bit, 채널당 변환시간 42 μsec인 A/D변환 포트가 제공되는 범용 16bit one-chip 마이크로프로세서인 8096을 이용할 경우를 가정한 것으로 연산시간은 50μsec로 충분히 잡은 경우이다. 3상의 전압을 비동기로 변환한 결과 변환시간 만큼씩의 위상 오차가 발생한 상황이 되어 연산된 속도가 맥동을 함을 알 수 있다.

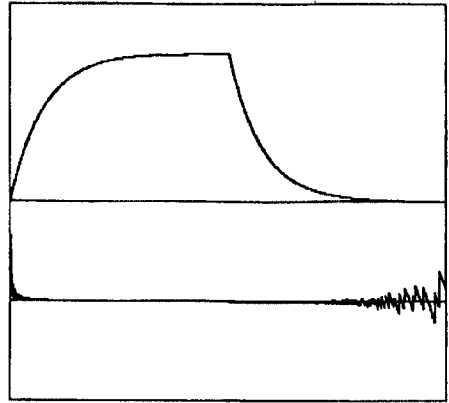
그러나 그림 8에 나타낸 변환시간 2μsec, 16bit A/D 변환기를 이용하고 DSP급 정도의 고성능 프로세서로 5μsec에 연산하는 경우를 가정한 모의실험 결과로는 지연시간과 연산시간이 매우 작으므로 극저속에서만 속도오차가 있음을 알 수 있다.



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 7. 제안방법 비동기 A/D 변환 후 디지털연산 모의실험 결과 1(정도 10비트, 변환시간 42 $\mu$ sec, 연산시간 50 $\mu$ sec의 경우)

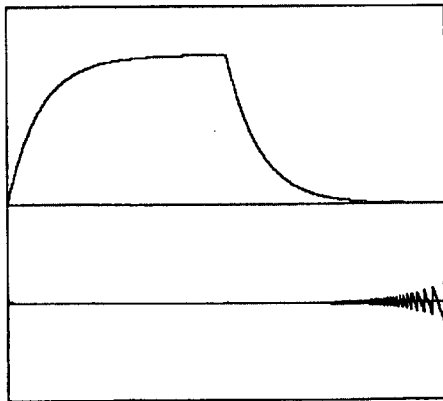
Fig. 7. Simulation result using proposed method at digital calculation after asynchronous A/D conversion 1.(in case of 10bit resolution, 42 $\mu$ sec conversion time, 50 $\mu$ sec calculation time)



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 9. 제안방법 동기 A/D 변환 후 디지털연산 모의실험 결과 1(정도 10비트, 변환시간 126 $\mu$ sec, 연산시간 50 $\mu$ sec의 경우)

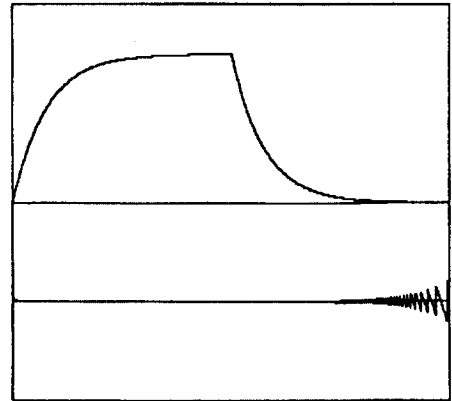
Fig. 9. Simulation result using proposed method at digital calculation after synchronous A/D conversion 1.(in case of 10bit resolution, 126 $\mu$ sec conversion time, 50 $\mu$ sec calculation time)



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 8. 제안방법 비동기 A/D 변환 후 디지털연산 모의실험 결과 2(정도 16비트, 변환시간 2 $\mu$ sec, 연산시간 5 $\mu$ sec의 경우)

Fig. 8. Simulation result using proposed method at digital calculation after asynchronous A/D conversion 2.(in case of 16bit resolution, 2  $\mu$ sec conversion time, 5 $\mu$ sec calculation time)



Max 1800[rpm] , 100[%] , 200[msec]

그림 10. 제안방법 동기 A/D 변환 후 디지털연산 모의실험 결과 2(정도 16비트, 변환시간 6 $\mu$ sec, 연산시간 5 $\mu$ sec의 경우)

Fig. 10. Simulation result using proposed method at digital calculation after synchronous A/D conversion 2.(in case of 16bit resolution, 6 $\mu$ sec conversion time, 5 $\mu$ sec calculation time)

그림 7의 경우와 같은 조건하에서 3상 전압을 동일 시점에 샘플홀더로 래치한 후 순차적으로 A/D변환한 동기식 A/D 변환을 적용한 결과를 그림 9에 나타내었

다. A/D변환시간과 속도 연산시간 지연에 따른 속도 오차만이 존재함을 알 수 있다. 그림 5의 M/T기법에 의한 결과보다 양호함을 알 수 있으며, 변환시간과 연

산시간을 그림 8의 경우와 같은 정도로 가정하였을 때의 모의실험 결과를 그림 10에 나타낸 바, M/T기법과 비교하였을 때 매우 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

이상의 모의 실험으로부터 본 논문에서 제안한 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 속도검출방법은 성능과 실용면에 있어 여타 속도검출 방법에 비하여 우수함을 알 수 있으며, 2상 타코제너레이터를 이용할 경우에는 연산 시간이 덜 소요 되므로 더욱 우수할 것임을 알 수 있다.

IV. 실험결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 회전각속도 및 회전각 연산에 대한 실험을 선형 연산소자를 이용한 경우와 디지털 연산의 경우에 대하여 수행하였고 성능 평가를 위하여 지류 타코제너레이터의 출력과 비교하였으며 이에 대한 시스템 블록도를 그림 11에 나타내었다.

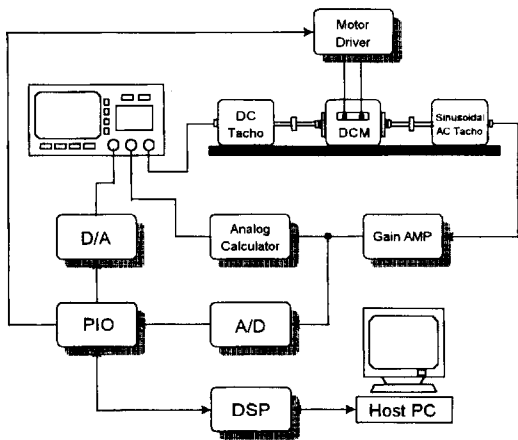


그림 11. 실험 시스템 블록도  
Fig. 11. Experimental system block diagram.

먼저, 그림 12는 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 13에 나타내었다.

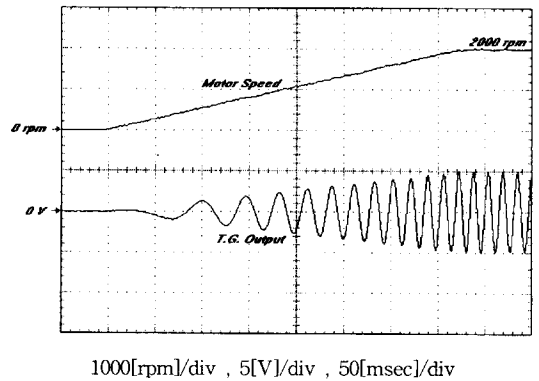


그림 12. 전동기 속도 변화시 정현파 교류 타코제너레이터의 출력파형  
Fig. 12. Output waveforms of sinusoidal ac tachogenerator at variable motor speed.

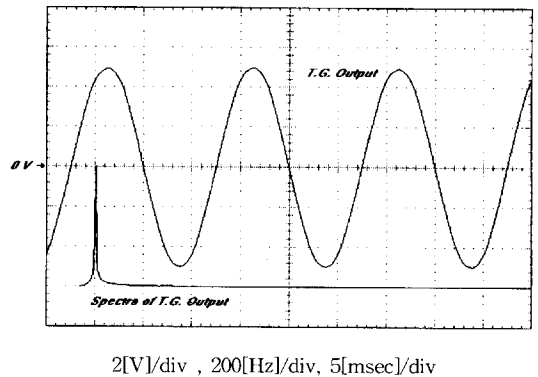


그림 13. 타코제너레이터 출력파형의 스펙트럼  
Fig. 13. Spectra of tachogenerator output waveforms.

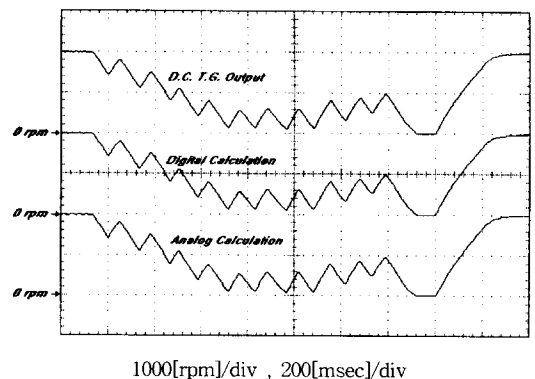
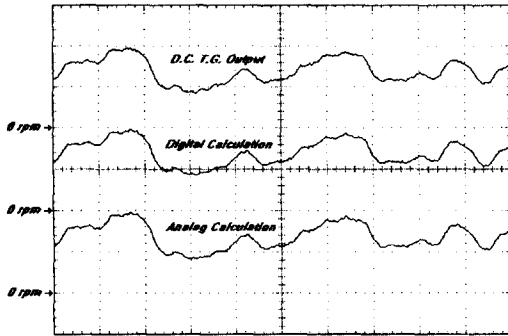
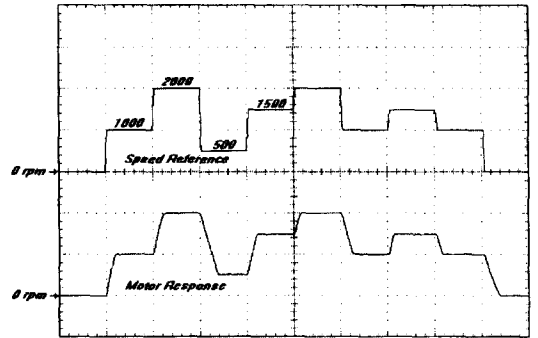


그림 14. 0-2000rpm 영역 속도연산 결과  
Fig. 14. Speed calculation results at 0-2000rpm ranges.



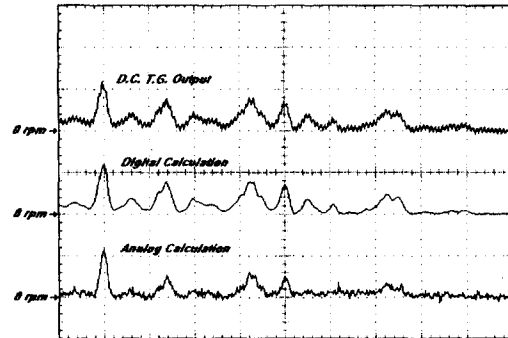
100[rpm]/div , 200[msec]/div

그림 15. 0-200rpm 영역 속도연산 결과  
Fig. 15. Speed calculation results at 0-200rpm ranges.



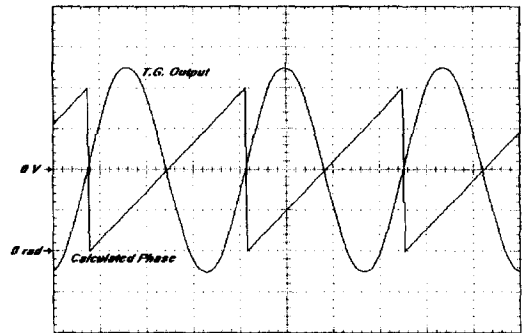
1000[rpm]/div , 500[msec]/div

그림 18. 단계적 속도 제어 결과  
Fig. 18. Stepwise speed control results.



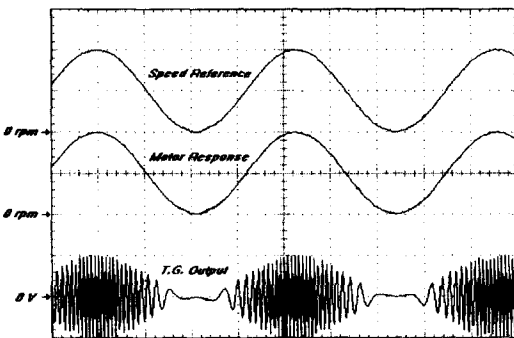
2[rpm]/div , 200[msec]/div

그림 16. 0-2rpm 영역 속도연산 결과  
Fig. 16. Speed calculation results at 0-2rpm ranges.



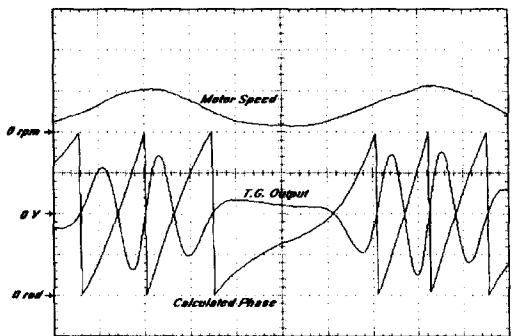
1[V]/div ,  $\pi/2$ [rad]/div , 10[msec]/div

그림 19. 정속시 회전각 연산 결과  
Fig. 19. Revolution angle calculation results at constant speed.



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

그림 17. 정현적 속도 제어 결과  
Fig. 17. Sinusoidal speed control results.



500[rpm]/div , 1[V]/div ,  $\pi/2$ [rad]/div , 50[msec]/div

그림 20. 가변속시 회전각 연산 결과  
Fig. 20. Revolution angle calculation results at variable speed.



그림 14는 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 0.067 [rpm]이며, 총 연산 소요시간을 5 [μsec]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. 오실로스코프의 관측결과로는 어느 것이든 속도 검출능력의 차이를 발견할 수 없었다. 그림 15는 그림 14의 경우와 같은 조건하에서 전동기 속도를 200 [rpm] 이하에서 미세 변화를 주었을 경우에 대한 속도 파형이다. 시간지연이나 속도의 오차가 역시 육안으로는 구분하기 힘들다.

그림 16은 2 [rpm] 이하의 속도에 대한 검출 결과로, 이 경우에는 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.

그림 17과 그림 18은 제한한 속도 연산을 적용, 직류전동기의 속도제어를 행한 결과이다. 그림 17은 전동기의 속도를 0 [rpm]에서 2000 [rpm] 사이에서 정현파 모양으로 지령한 경우이며, 그림 18은 계단 모양으로 지령한 경우이다. 이 때 속도 연산은 12 [bit] A/D변환 후 디지털 연산을 행하였으며 정도는 최고 검출속도 2200 [rpm], 속도분해능 1.07 [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 결과이다. 짧은 시간에 정확한 속도 검출이 가능함에 따라 제어 성능이 우수한 것으로 평가되어 진다.

그림 19와 그림 20은 회전각 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 회전각을 유지하

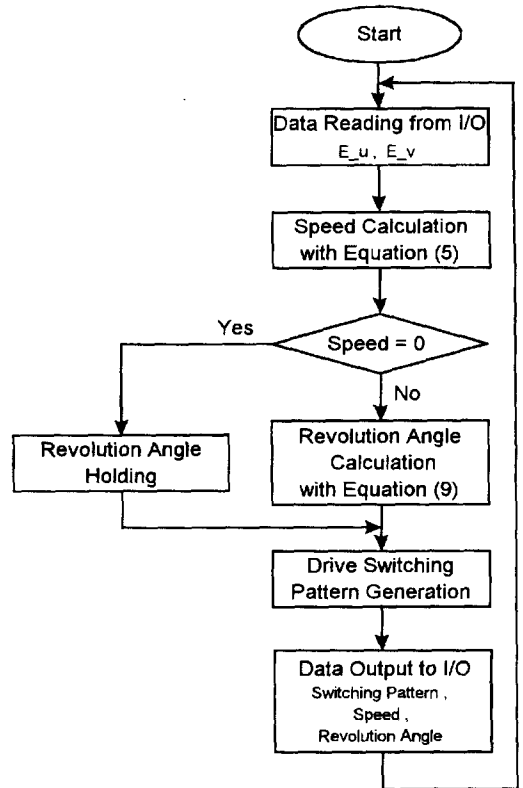


그림 21. 소프트웨어 플로우차트  
Fig. 21. Software flowchart.

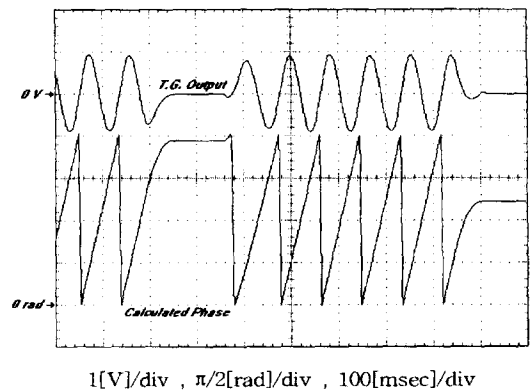


그림 22. 0속도 발생시 회전각 연산 결과  
Fig. 22. Revolution angle calculation results at zero speed.

는 알고리즘을 적용하였고 이에 대한 플로우 차트를 그림 21에 표시하였으며 실제 0속도 발생 상황에 대한 실험 결과를 그림 22에 나타내었다. 0속도가 발생하면 0속도 이전의 회전각을 유지하고 전동기가 다시 회전하기 시작하면 새로운 회전각을 연산하여 출력하기 때

문에 아크사인 연산에 의하여 회전각을 연산하는 것이 가능함을 알 수 있다. 그러나 저속의 범용 마이크로프로세서로 아크사인 연산을 수행할 경우 연산시간이 길어지는 단점이 발생한다. 이 경우에는 아크사인 롬 테이블을 이용하면 회전각 연산에도 별 문제점이 없을 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 고조파가 포함되지 않은 정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 속도 및 위상각 검출에 대하여 각각의 연산 알고리즘을 제시하고, 컴퓨터 모의 실험 및 실험을 통하여 제안한 방법의 우수성과 유용성을 입증하였다. 특히 전동기 제어에 적용한 결과로써 순시속도 예측기법을 적용하지 아니하고도 정확하고 빠른 응답을 얻을 수 있었다. 따라서 고성능의 직류서보 전동기의 광범위한 속도 범위의 급변속이 요구되는 경우 또는 전동기의 극저속 운전시에 매우 유용할 것으로 판단되며, 단일 센서로 속도와 회전각을 검출할 수 있으므로 이 점 또한 장점으로 판단된다.

그러나 본 논문에서 제안한 방법은 타코제너레이터의 출력전압이 완전한 정현파이어야 한다는 제약이 따르므로 타코제너레이터의 설계와 제작에 있어 주의하여야 한다. 현재 기전력 파형이 거의 완전한 정현파인 PMSM이 있으므로 이를 그대로 적용이 가능하다. 만일 전동기 또는 발전기의 경우라면 전기자 전류에 의한 자속분포의 왜형 등이 문제시 되나 속도 검출을 위한 타코제너레이터로 이용하는 경우 전기자 전류는 거의 흐르지 않으므로 이에 의한 고조파 발생은 없을 것으로 판단된다.

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

※ 본 논문은 1996년도 유한전문대학 학술연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

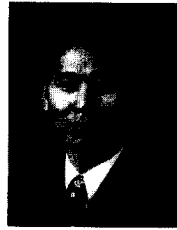
- [1] K. Fujita et al., "Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for a Servo Systems", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-28 No. 4, pp. 864-872, July/Aug. 1992.
- [2] 설승기의 1명, "위치센서없는 PMSM의 고성능운전을 위한 새로운 제어 방법", 전기학회논문지 Vol. 44, No. 8, pp. 1018 - 1026, 1995
- [3] T. Ohmae et al., "A 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", 한국자동제어 학술회의논문집, pp. 365-369, 1993
- [6] 조규민 외 1인, "3상 타코 제너레이터를 이용한 전동기 속도검출 알고리즘", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 278 - 281, 1995
- [7] 조규민 외 2인 "정현파 교류 타코제너레이터를 이용한 전동기 속도 및 회전각 검출", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 415 - 419, 1996
- [8] Shuichi Shimano et al., "Estimation of Acceleration with an AC Tachogenerator and its Application for Servo Control", 일본 전기학회 논문집D 110권 7호, pp.791-797, 1990.

## 저 자 소 개



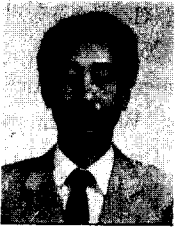
崔正秀(正會員)

1965년 10월 7일생. 1992년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1995년 ~ 1996년 LG 산전연구소 연구원. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정



劉完植(正會員)

1963년 12월 24일생. 1988년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 특허청 심사관



曹圭珉(正會員)

1961년 4월 22일생. 1985년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1994년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 유한전문대학 정보통신과 조교수