

정현파 엔코더를 이용한 서보전동기의 초정밀 위치제어에 관한 연구

김주찬*(부산대 대학원 전기공학과), 김장목(부산대), 김철우(부산대), 최철(OTIS-LG)

Study on Ultra Precise Position Control of Servomotor using Analog Quadrature Encoder

J. C. Kim(Elec. Eng. Dept. PNU), J. M. Kim(Elec. Eng. Dept. PNU), C. W. Kim(Elec. Eng. Dept. PNU),
C. Choi(OTIS-LG)

ABSTRACT

This paper describes the ultra precise position control of servo motor using sinusoidal encoder based on 'Arcsine Interpolation Method' [1]. First, the paper theoretically analyzes and verify throughout experiments, the relationship between A/D converter input ripple and the total resolution to measure the precise position. Second, this paper presents a way to compensate the total gain and offset error by utilizing a low cost programmable differential amp, by which without any special expensive equipments they are easily on-line tuned and effectively compensated. Lastly, it was compared to servomotor position control characteristics using digital incremental 50,000ppr encoder. The test results show that, with much cheaper sinusoidal encoder, the proposed method exhibits better performance both in position control and ASD applications than the 50,000ppr optical encoder.

Key Words : sinusoidal encoder, interpolation, arctangent method, arcsine method, A/D Converter, gain and offset errors

1. 서론

최근 현대 산업전반에 걸쳐 고정밀 서보전동기 제어의 필요성이 급격히 증가하는 추세에 있으며, 이러한 변화는 반도체 산업 및 새로운 디스플레이 장치, 광학부품, 제조분야, 항공우주 산업 분야 등에서 현저하게 나타나고 있다. 고정밀 서보전동기 제어를 위해서는 시스템에 적합한 정밀도의 위치변위 검출이 필수적이고 이는 전체 시스템의 신뢰성을 결정하는 중요한 척도가 된다. 실제 변위 및 속도 측정 장치의 선정에 있어서 고정밀도 디지털 증분형 엔코더의 가격적인 측면과 대역폭 제한의 이유로 정현파 엔코더를 이용한 변위 및 속도 검출에 대한 연구가 진행되고 있다^[5,6,7,8]. 정현파 엔코더를 이용한 변위측정에 관한 기존 연구에서는 엔코

더 아날로그 출력신호 오차를 보상하는 방법에 관한 연구가 주를 이루고, 정현파 엔코더를 이용한 고정밀 서보전동기 제어에 관한 연구는 사례가 거의 없다.

본 논문에서는 신호처리회로 비용에 대하여 최적화된 '아크사인 보간방식(Arcsine Interpolation Method)^[1]' 을 이용한 고정밀 서보전동기 제어에 대하여 기술한다. (1) '아크사인 보간방식' 을 이용한 서보전동기 제어시스템의 하드웨어 구성 및 회전자 위치각 연산방법에 대해서 기술하였다. (2)A/D 변환기에 의하여 결정되는 아날로그 회전자 위치각 정보의 최대 해상도를 유지하기 위한 A/D 변환기 입력신호 오차에 대한 전체 시스템 제어정밀도 특성을 이론적으로 해석하고, 실험을 통하여 검증하였다. (3)아날로그 및 디지털 회전자 위치각

정보의 오차를 결정하는 정현파와 엔코더 출력으로부터 프로세서 입력에 이르기까지 프로그램 가능한 저가형 차동증폭 소자를 이용한 온라인상에서의 효과적인 전체 이득 오차와 옴셋 오차 보상방법에 대하여 기술하였다. 최종적으로 '아크사인 보간방식'을 이용한 서보전동기 위치제어 정밀도와 가변속 구동 특성은 광학식 디지털 증분형 5만 펄스 엔코더를 이용한 서보제어 특성과 비교되었다.

2. 정현파와 엔코더 신호처리 원리

정현파와 엔코더를 이용한 서보전동기 제어시스템에서의 전동기 회전자 위치각은 정현파와 엔코더 아날로그 출력신호인 아날로그 전동기 위치각 정보, 그리고 기준신호와 아날로그 신호의 비교기 출력신호로 표현되는 디지털 전동기 위치각 정보에 의해서 연산된다. Fig. 1은 정현파와 엔코더 출력 신호처리를 위한 일반적인 회로구성을 나타낸다.

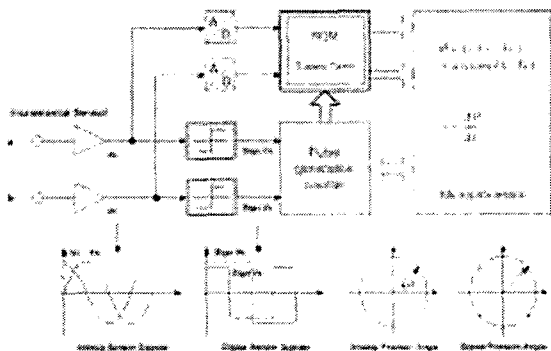


Fig. 1 Schematic diagram of typical decoding circuitry of a sinusoidal encoder incorporating quadrature decoding and phase interpolation

디지털 회전자 위치각 정보는 전동기 회전자 기계적 1회전에 대한 아날로그 증분신호 주기의 횟수로 표현되며, 이는 제조 공정상에서 결정되기 때문에 정현파와 엔코더 모델에 따라서 다르다. 전동기 회전자 1회전에 대한 아날로그 증분신호의 횟수를 'M'으로 두면, 디지털 회전자 위치각 정보에 의한 위치제어 정밀도는 식 (1)으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{digit} = 360^\circ / M \quad (1)$$

식 (1)에 의해서 결정된 각각의 등간격 구간에 대해서 아날로그 출력신호는 한 주기로 나타나고, 최종 마이크로프로세서 연산을 위하여 A/D 변환기를 거쳐 디지털 값으로 변환된다. 이때, A/D 변환

기의 해상도는 식(1)에 의해 결정된 각 구간내의 위치제어 정밀도를 결정한다. 이는 디지털 증분형 엔코더와 비교할 때 '가상의 펄스(virtual pulse)'로 생각할 수 있다. 이상의 관계로부터 정현파와 엔코더를 이용한 서보전동기 위치제어 시스템에서의 이론적인 전체 위치제어 정밀도는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{final} = \theta_{digit} \times K \quad (2)$$

여기서, K는 A/D 변환기 해상도

서보전동기 회전자 위치각 연산을 위하여 정현파와 엔코더의 두 아날로그 출력신호 V_s 와 V_c 가 이상적이라고 가정하면, 식(3)과 식(4)로 표현된다.

$$V_s = V_p \sin \theta \quad (3)$$

$$V_c = V_p \cos \theta \quad (4)$$

여기서, θ : 아날로그 회전자 위치각, V_p : 엔코더 출력신호의 진폭

아크탄젠트 연산을 이용한 아날로그 회전자 위치각 θ 는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_s}{V_c} \right) \quad (5)$$

식 (5)의 아날로그 회전자 위치각과 그림 (1)의 펄스 발생 카운터에 저장된 아날로그 정현파 출력신호 V_s 의 카운팅 횟수로부터 식 (6)에 의해 전동기 회전자 기계각을 구할 수 있다.

$$\theta_{mech} = \frac{1}{M} [(N \times 360) + \theta] \quad (6)$$

여기서, θ_{mech} : 전동기 회전자 기계각, N : 기준 신호 이후의 V_s 카운팅 횟수

전동기 회전자 기계각 θ_{mech} 연산은 Fig. 1에서와 같이 시스템 응답성을 향상시키기 위해서 A/D변환기 출력신호인 아날로그 회전자 위치각 정보와 펄스 발생 카운터 출력인 디지털 회전자 위치각 정보로부터 룩업 테이블을 이용하여 처리할 수 있고, 메모리 비용 감소를 위하여 마이크로프로세서에서 직접 처리할 수도 있다^{5,7)}.

3. 제안된 방식의 시스템 구현

3.1 하드웨어 구성 및 신호처리 원리

아크사인 보간방식(Arcsine Interpolation Method)을 이용한 서보전동기 구동을 위한 정현파와 엔코더의 아날로그 출력 신호처리 주요 회로구성은 Fig. 2와 같고, 사용된 주요 소자는 다음과 같다.

- (1) 차동 입력형 필터 : 인버터 구동에 의해 발생되는 커먼 모드 노이즈(Common Mode Noise)를 제거하기 위하여 사용되었다.
- (2) 이득 및 옵셋 조정소자 AD8330 : 정현파 아날로그 출력신호의 이득 및 옵셋 오차를 온라인 상에서 보상하기 위한 저가형 소자이다.
- (3) 16비트 A/D 변환기 AD7665 : 프로세서에서 연산할 수 있는 아날로그 회전자 위치각 정보를 구하기 위하여 사용되었다.
- (4) 비교기 : 디지털 회전자 위치각 정보를 얻기 위하여 사용되었다.

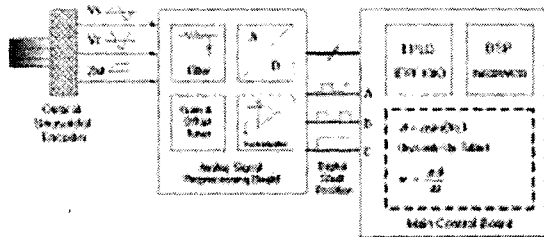


Fig. 2 Hardware configuration for the proposed method

제안된 방식의 신호처리 원리는 정현파 엔코더 여현파 출력신호 V_c 를 이용하여 아날로그 회전자 위치각 정보를 구하고, 정현파 출력신호 V_s 의 비교기 출력신호를 카운팅해서 디지털 회전자 위치각 정보를 구한다. 아크사인 연산된 여현파 출력신호 V_c 의 대칭적인 출력에 대한 구간 판별은 V_c 를 제로 크로싱함으로써 구할 수 있다¹¹⁾.

아날로그 회전자 위치각 연산을 위해서 정현파 엔코더 여현파 출력신호 V_c 는 이득 및 옵셋 조정소자에 의해서 A/D 변환기 최대입력범위로 조정된 후 A/D 변환기에 의해서 DSP에서 연산될 수 있는 디지털 값으로 변환된다. 이 값은 주제어보드 DSP 내부메모리에 설계된 아크사인 룩업 테이블과 매칭된다. 설계된 아크사인 룩업 테이블은 식 (7)에 의해서 구해진다.

$$\theta_{asin} = \sin^{-1}(V_c) \quad (7)$$

이득 및 옵셋이 조정된 정현파 출력신호의 비교기 출력신호는 주제어보드 FPGA내의 카운터에 의해서 값이 저장되고, 기준 신호에 의해서 리셋된다. 카운팅 된 데이터는 디지털 회전자 위치각 정보로 이용되고, 비교기 출력 정현파 신호 V_c 의 상태 (high or low)와 룩업 테이블의 값으로부터 아날로그 회전자 위치각 정보를 얻을 수 있다. 구해진 아날로그 및 디지털 회전자 위치각 정보로부터 식

(6)에 의해 서보 전동기 회전자 위치각을 연산할 수 있다.

3.2 A/D 변환기 입력신호 제한

전동기 회전자의 위치각의 정밀도는 아날로그 회전자 위치각 정보와 디지털 회전자 위치각 정보에 의해서 결정된다. 디지털 회전자 위치각 정보의 경우는 정현파 엔코더 아날로그 출력신호 V_s 와 V_c 의 크기와 옵셋이 적절히 보상되고, 기준신호 V_z 와 시간적으로 동기화되면 큰 오차는 발생되지 않는다. 그러므로 전동기 회전자 위치각의 정밀도는 사실상 정현파 아날로그 출력신호처리에 의해서 결정된다고 볼 수 있다. Fig. 3은 정현파 엔코더 아날로그 출력신호의 경로와 그에 따른 오차를 나타낸다.

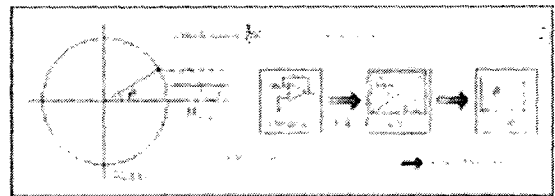


Fig. 3 Analog signal path and errors

아날로그 출력신호의 오차는 크게 정현파 엔코더 자체 오차와 변위 측정을 위한 신호처리회로 소자 특성에 따른 오차로 나눌 수 있다. 해석의 편의를 위해서 정현파 엔코더 자체 오차를 무시하면, 전동기 위치각 제어정밀도를 보장하기 위해서는 다음의 조건을 만족하여야 된다.

- (1) A/D 변환기 입력신호는 설계된 A/D 변환기의 최대입력범위의 크기로 설정되어야 된다.
- (2) A/D 변환기의 입력신호 오차는 식(8)을 만족하여야 된다.

$$V_{error} \leq \frac{A_{fs}}{(2^n - 1)} \quad (8)$$

여기서, V_{error} : A/D 변환기 입력신호 오차, A_{fs} : 설정된 A/D 변환기 최대입력 범위, n : A/D 변환기 비트 수

실제 시스템 설계에 있어서 요구되는 위치제어 정밀도에 대하여 식 (2)에 의해서 A/D 변환기를 선정할 수 있고, 이때 A/D 변환기 입력신호 오차는 식 (8)을 만족하여야 된다. 만일 식 (2)에 의해서 선정된 A/D 변환기에 대해서 입력신호 오차가 식 (8)을 만족하지 못하는 경우에는 선정된 A/D 변환기의 최대 해상도를 얻지 못한다. 이 경우에는 A/D 변환

기 입력신호 오차를 식 (8)을 만족하도록 신호처리 회로를 다시 설계하거나, 불가능한 경우에는 식 (8)을 이용해서 A/D 변환기 비트 수를 선정함으로써 A/D 변환기의 비트 수 증가에 따른 추가적인 비용을 감소할 수 있다.

3.3 크기 및 오프셋 보상 방법

아날로그 출력신호의 크기 및 오프셋 오차는 정현파 엔코더 출력신호의 오차와 신호처리회로에 의한 오차로 생각할 수 있다. 신호처리회로에 의한 크기 및 오프셋 오차는 크게 아날로그 필터회로와 A/D 변환기에 의한 오차로 나눌 수 있다. 이러한 오차들은 위치제어 정밀도에 커다란 영향을 미치기 때문에 반드시 보상되어야 된다. 제안된 방식의 보상 방법은 Fig. 4와 같고, 보상 순서는 다음과 같다.

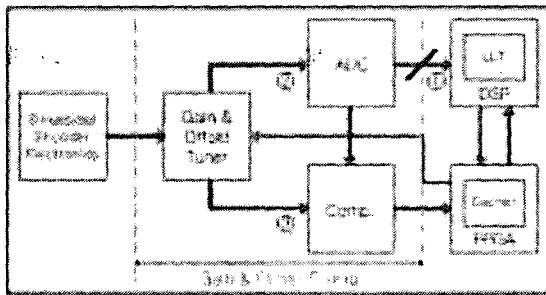


Fig. 4 Signal flow diagram about the proposed gain & offset compensation

①이득 및 오프셋 조정소자 AD8330를 제어하면서 A/D 변환기 출력을 관측한다. A/D 변환기 출력 크기는 A/D변환기 최대입력 범위로 설정하고, 오프셋을 조정한다. ②조정된 A/D 변환기 여현파 입력신호 V_c 의 크기를 관측하면서 정현파 출력신호 V_s 의 크기와 오프셋을 조정한다. ③조정된 정현파 및 여현파 출력신호 V_s 와 V_c 를 기준신호 V_z 와 비교하고, V_s 와 V_z 는 동기화되지 않았을 경우 FPGA 내부에서 로직을 이용하여 동기화 시킨다. 언급된 소자 사용의 장점은 정현파 엔코더 자체 출력신호의 크기와 오프셋의 변화뿐만 아니라 엔코더 신호처리를 위한 전용 보드 소자들에 의한 신호 크기와 오프셋의 변동에 대하여 실시간 보상이 가능하며 온라인 조정이 가능하다는 점이다.

3.4 전동기 회전자 위치각 연산

전동기 회전자 위치각은 정현파 엔코더 출력신호의 전체 이득 및 오프셋을 보정한 후, 아날로그 전동기 위치각 정보와 디지털 전동기 위치각 정보로부

터 연산될 수 있다. 전동기 회전자 위치각 연산 순서는 Fig. 5와 같다.

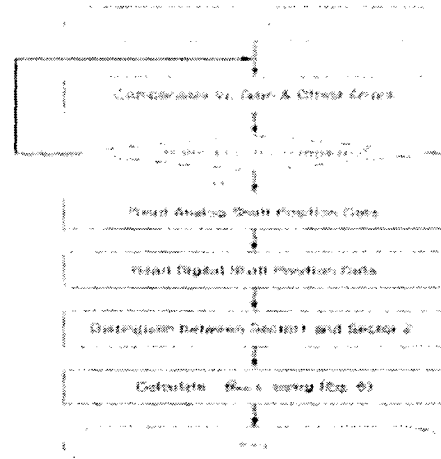


Fig. 5 Flow chart for servomotor rotor position calculation

4. 실험

4.1 전체 시스템 구성

실험에 사용된 교류 전동기 구동 시스템의 전체 구성은 Fig. 6과 같으며 사용한 영구자석형 동기전동기의 제원은 Table 1과 같다. 디지털 증분형 5만 펄스 엔코더는 다마가와와 TS5178N60이고 전동기의 반부하측에 장착되었다. 정현파 엔코더는 하이덴하인사의 ERN1387이며 전동기의 부하측에 장착되었다.

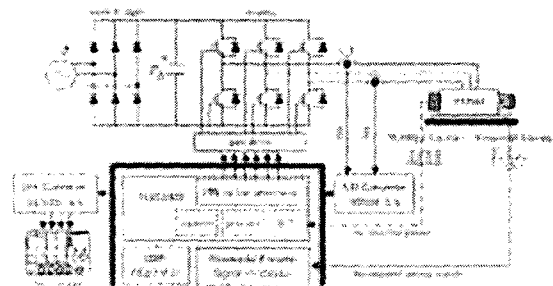


Fig. 6 Laboratory experimental set-up

Table 1 Nominal parameter of PMSM in experiment

Nominal Parameters of PMSM			
Rated voltage	220[V]	Poles	8
Rated current	7.2[A]	Stator resistance	0.91[Ω]
Rated speed	1000[rpm]	Stator reactance	4.2[m Ω]
Maximum speed	2000[rpm]	BackEMF constant	0.14[V/rad/s]

4.2 실험과형

4.2.1 A/D 변환기 입력 맥동 vs 출력 특성 실험중.

4.2.2 위치제어정밀도 비교

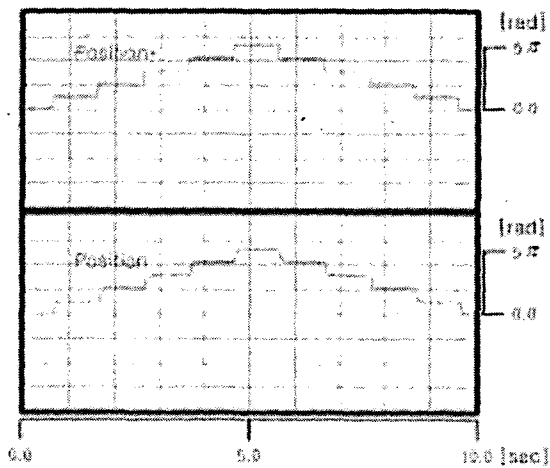


Fig. 7 Position Control Characteristics of 50,000ppr Encoder

4.2.3 가변속 구동특성 비교 실험중.

5. 결론

본 논문에서는 '아크사인 보간방식'에 근거한 정현파 엔코더를 이용한 서보전동기의 위치제어 특성 및 가변속 구동 특성에 대하여 기술하였다. 이에 앞서, 제안된 방식을 이용한 회전자 위치각 연산을 위한 하드웨어 구성과 신호처리 방식에 대하여 기술하였다. 다음으로 고정밀도의 서보전동기 제어를 위하여 A/D 변환기 입력신호 제한 조건에 대하여 이론적으로 해석하고, 저가형 프로그램 가능한 차동증폭 소자를 이용한 아날로그 출력신호의 크기 및 오프셋 오차에 대한 효과적인 온라인 보상방법에 대하여 기술하였다. 최종적으로 제안된 방식의 서보전동기 위치제어 정밀도 및 가변속 구동 특

성을 검증하기 위하여 광학식 디지털 증분형 5만펄스 엔코더를 이용한 서보제어 특성과 비교되었고, 실험을 통하여 정현파 엔코더에 비해 상당히 고가인 5만펄스 엔코더 그 이상의 성능을 나타냄을 검증하였다.

참고문헌

1. 김명환, 김장목, 김철우, 최철 "정현파 엔코더를 이용한 정밀위치 측정방법에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제9권, 제5호, pp.485-490, 2004.
2. W. Leonhard, "Control of Electrical Drives, pp. 345-354," 2nd Edition, Springer, 1996.
3. John G. Webster, The measurement, instrumentation, sensors handbook, CRC Press, pp. 6.98-6.119, 1999
4. Heidenhain, Heidenhain General Catalog, 2003.
5. N.Hagiwara, Y.Suzuki, and H.Murse, "A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique," IEEE Trans, Instrum. Meas, 41(1), pp. 98-101, 1992.
6. O.Benzaid and B.M.Bird, Interpolation techniques for incremental encoders, Proc. 23rd Int. Intelligent Motion Conf., June 22-24, 165-172, 1993.
7. J.R.R.Mayer, "High-resolution of rotary encoder analog quadrature signals," IEEE Trans. Instrum. Meas. 43(3), pp. 494-498 1994.
8. R.C.Kavanagh. "Probabilistic learning technique for improved accuracy of sinusoidal encoders," IEEE Trans. Ind. Electron. Vol.48. no.3. pp673-681. June 2001.
9. K.K.Tan, Huixing X.Zhou, and Tong Heng Lee, "New Interpolation Method for Quadrature Encoder Signals," IEEE Trans. Instrum and Meas. Vol.51. no.5. 2002.
10. Ramon Pallas-Areny, Sensors and Signal Conditioning, Wiley interscience, pp. 433-444, 2000.
11. C.Yien, "Incremental encoder errors: Causes and ways to reduce them," in Proc. PCIM'92, Nuremberg, Germany, Apr. 1992. pp. 110-121