

초음파 모터의 위치제어를 위한 최대속도 알고리즘

이을재 · 이영대 · 김영석
인하대학교 공과대학 전기공학과

A Higher Reaching Speed Algorithm for the Position Control of Ultrasonic Motors

Eul-jae Lee Young-dae Lee Young-seok Kim.
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

Abstract - A new higher reaching speed algorithm for the position control systems of the traveling wave type Ultrasonic Motors(USM) is presented. As the frictional forces of the stator materials revolves the rotor, the temperature of the contact surfaces is increased. It deteriorates the performance of control system so that the control frequency of inverter deviate from the natural resonant frequency of USM during the normal operation. In order to get higher reaching speed in the position control, we propose a novel algorithm that detect the resonant frequency of USM using the simple hardware and decision processing. The effectiveness of proposed algorithm is verified by the experimental results.

1. 서 론

초음파 모터는 기존의 전자기식 모터와는 달리 자기회로 즉, 철심과 코일이 없는 새로운 형태의 소형 모터로 압전세라믹 소자(piezoceramics)의 진동에 의해 발생하는 마찰력으로 회전자가 회전한다. 이에 따라 기존의 모터에서는 얻을 수 없는 많은 장점을 가지고 있는데 예를 들면 저속에서 고투크발생, 구조의 단순성, 형태의 다양성, 자기장의 영향없음 등이 그것이다[1]. 특히 기존의 모터와는 달리 정지토크(holding torque)가 매우 크고 응답속도가 매우 빠른 특성을 가지고 있어 액추에이터등에 이를 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 여러 형태의 초음파 모터들중에서 진행파형 초음파 모터(traveling wave type ultrasonic motor)가 서보 콘트롤 혹은 액추에이터로 많이 사용되고 있다. 하지만 기존의 모터들은 대부분 수학적 모델링이 가능한 반면 초음파 모터는 아직까지 정교화된 모델식이 정립되지 않고 있다. 이는 모터의 구조에 기인한 것으로 온도상승에 따른 압전세라믹 소자의 특성변화, 마찰계수의 감소등으로 인하여 비선형성이 증가되기 때문이다. 따라서 대부분의 경우 통상적인 PI 제어[3] 혹은 모델을 필요로 하지않는 Fuzzy 제어[4], Neural network[5]등을 이용하여 속도와 위치제어를 수행하고 있으나 만족할 만한 성과를 얻지 못하고 있다.

초음파 모터를 제어하기 위한 parameter들로는 구동주파수, 인가전압 그리고 인가전압의 위상차가 있다. 구동주파수를 변경하여 제어를 하는 방법은 모터의 유효 공진 주파수 대역이 넓지 않고 특이 낮은 주파수의 특정부분에서 갑자기 모터가 정지하게 되는 특성으로 인하여 많이 사용되고 있지 않다. 인가전압을 변경하여 제어하는 방법에서는 초음파 모터 고유

의 hysteresis 특성으로 인한 정지, 기동시 및 부하변동시의 토크 변화가 크기 때문에 제어기의 dynamic가 상당히 커야 한다. 이에 따라 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 제어방식은 위상차를 이용한 방법이며 위상의 변화에 따른 속도 및 토크가 거의 선형적으로 제어되는 것으로 알려져 있다[6,7]. 그렇지만 위상차만을 이용한 제어에서는 온도상승등으로 인하여 모터의 공진주파수가 변경된 경우 위상 제어에 의한 속도 제어의 범위가 한계를 가지게 된다. 따라서 가장 효율적인 초음파모터 구동 시스템은 모터의 공진주파수를 추종하면서 위상차 제어에 의한 속도 및 위치제어를 동시에 수행하는 hybride 형태의 제어방식이다.

본 논문에서는 초음파 모터를 이용한 위치제어 시스템 구현시 모터의 공진주파수를 간단한 하드웨어를 사용하여 직접 검출함으로써 공진주파수 변경에 관계없이 빠른 도달 속도를 얻을 수 있는 최대 속도 알고리즘에 대하여 설명하도록 하겠다. 아울러 제안한 알고리즘의 타당성 여부를 검토하기 위하여 실험을 실시하였으며 그 결과를 도시하였다.

2. 초음파 모터의 동작 특성

진행파형 초음파 모터는 압전세라믹 소자에 가해지는 2상의 정현파 전압에 의해 발생하는 진동을 여기원으로 하여 회전자가 회전한다. 그림 1은 초음파 모터의 구동원리를 나타낸 것으로 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 모터 내부는 압전소자, 전극, 고정자 및 고정자에 밀착된 회전자로 이루어져 있다. 고정자의 하부에 부착된 압전세라믹 소자에 공진주파수 근처의 교류전압을 인가하면 전원의 극성에 따라 탄성체(고정자)의 표면에 상하의 진동이 발생하게 되는데 이러한 진동을 정상파(standing wave) 운동이라 한다. 이때 전압의 크기는 같고 위상이 다른 교류전압을 인가하게 되면 상하의 진동이 회전방향을 같은 타원운동으로 바뀌게 되는데 이를 진행파(traveling wave) 운동이라 한다. 진행파가 발생되고 있는 고정자 상단에 밀착된 회전자에는 타원운동으로 인하여 진행파의 방향과 반대방향으로 마찰력이 작용하게 되므로 회전력이 발생하게 된다.

3. 공진주파수 검출 알고리즘

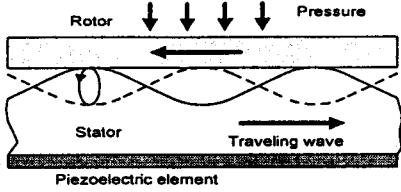


그림 1 초음파 모터의 구동원리
Fig. 1 Driving principle of traveling wave type ultrasonic motor

초음파

모터의 회전력은 고정자의 표면에서 발생한 타원운동이 회전자를 마찰함으로써 발생된다. 따라서 운전시 접촉점의 마찰에 의한 온도상승이 일어나며 이는 압전세라믹 소자의 특성변화를 유발하게 된다. 이러한 결과로 모터 고유의 공진주파수가 변화하게 되는데 온도가 상승할수록 공진주파수가 낮은 쪽으로 이동하게 되며 주파수 제어를 행하지 않는 경우 회전력이 저하되게 된다. 일반적으로 모터를 사용하여 위치제어를 행하는 경우 목표위치에 빨리 도달하도록 제어기를 구성한다. 그렇지만 초음파 모터를 사용한 위치제어 시스템은 온도상승에 의한 공진주파수의 변화로 인하여 시간이 경과함에 따라 도달속도가 저하되게 된다. 따라서 속도의 저하를 보상하기 위해서는 주파수의 제어가 필요하다. 본 논문에서는 이처럼 온도상승으로 인한 공진주파수의 변화 때문에 도달속도가 저하되는 것을 보상하기 위하여 공진전압을 이용한 공진주파수 검출 방법에 대하여 제안한다.

그림 2는 동작 주파수의 변화에 따른 공진전압의 추이를 나타낸 것이다. 파형 (a)는 모터의 기동직후의 공진전압을 나타낸 것으로 41kHz 부근에서 전압의 크기가 가장 크게 나타나는 반면 5분이 경과한 이후에는 파형 (b)에서처럼 공진전압이 40kHz 부근에 크게 나타나고 있다.

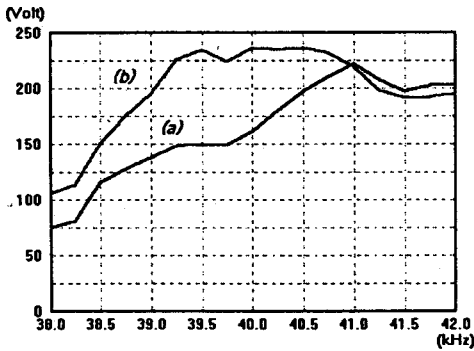


그림 2 초음파모터의 공진전압 특성
Fig. 2. Characteristics of resonant frequency of USM

본 논문에서는 다음과 같은 방법을 사용하여 모터의 공진주파수를 검출하였다. 먼저 위치제어를 수행하기 직전에 수 ms 동안 모터의 유효 공진 주파수를 수 100Hz 단위로 분할하여 모터에 출력한다. 이때 각 주파수의 유지 기간은 수 100 μs 정도이며 이 기간 동안 식 (1)에서와 같이 digital 고정평균 필터를 사용하여 average값을 계산하고 결과값을 메모리에 저장시킨다. 이후 휴지시간을 거쳐 식 (2)에서처럼 새로운 주파수를 출력시킨 후 상기의 과정을 반복한다. 유효 공진주파수

전부를 출력하고나면 메모리에 저장된 각 주파수의 공진전압들로부터 최대 공진전압이 발생한 주파수를 검사하여 다음번 위치제어에 적용할 공진주파수를 설정한다.

$$V(k) = \frac{1}{N} \sum v(n), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$\hat{f}_r(k+1) = \hat{f}_r + \Delta f, k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (2)$$

$$f_r = \hat{f}_r \{ \max [V(k)] \} \quad (3)$$

그림 3은 본 논문에서 제안한 초음파 모터 위치제어 시스템의 공진 주파수 검출 알고리즘을 도시한 것이다.

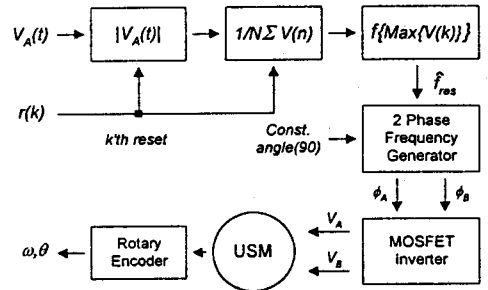


그림 3 공진주파수 검출을 위한 제어기 구성도
Fig. 3 Block diagram of resonant frequency detecting

4. 초음파 모터 구동 System

그림 4는 본 논문에서 사용한 초음파 모터 구동 system을 블록도로 나타낸 것이다. 진행파형 초음파 모터를 구동하기 위해서는 위상차를 갖는 2상의 정현파전원이 필요하다. 또한 스위칭 주파수가 매우 높으므로 MOSFET 소자를 이용한 half bridge inverter 장치를 구성하고 직렬로 연결된 inductor(L1, L2)와 초음파 모터 내부의 기생 capacitance에 의한 공진이 발생되도록 하여 정현파 전원이 모터에 공급되도록 하였다. 모터 공진주파수 검출 알고리즘 및 제어 시퀀스는 16bit microcontroller인 i80C196KC를 16MHz로 구동하여 수행하였으며 주파수 및 위상지연 신호는 timer/counter 전용 IC인 82C54를 이용하여 발생시키고 있다. 또한 4 채널의 12 Bit DAC(digital to analog converter)를 사용하여 parameter의 판독이 가능토록 하였으며 이와는 별도로 내부 메모리에 저장된 데이터를 rs232c 직렬 통신을 통하여 host PC로 전송할 수 있게 되어 있다. 위상 및 속도 정보는 10000 pulse/rev 분해능을 갖는 encoder를 2채배하여 사용하였다.

5. 실험 및 결과 고찰

이 장에서는 제안한 모터 공진주파수 검출방법에 대하여 실험을 통해 결과를 알아보고 이를 위치제어에 적용하였을 때의 효과에 대하여 살펴보도록 하겠다.

그림 6는 주파수를 41.0kHz로 고정하고 위치제어를 수행한 것으로 이때 두상의 위상차는 최대 속도를 얻기 위해 90도로 고정하였다. 시간에 따른 속도변화를 살펴기 위해 목표위치에 도달 후 1초간 휴지시간을 갖은 다음 새로운 목표위치에 도달

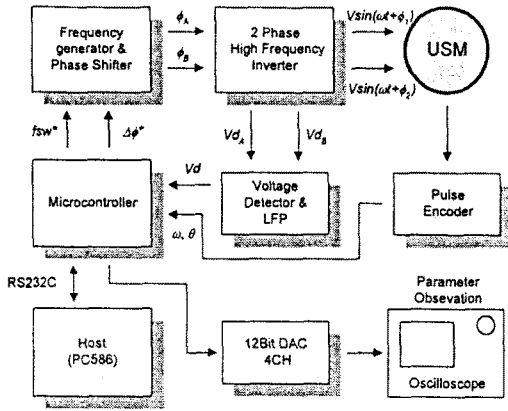


그림 4 공진주파수 검출기능을 갖는 위치 제어시스템
Fig. 4 Block diagram of position control system with

resonant frequency detecting

하는 과정을 반복하도록 프로그램을 하였다. 그림에서 (a)는 위치를 나타내고 있으며 (b)는 목표위치 도달시까지의 시간을, (c)는 구동주파수를 나타낸 것이다. 그림에서 보던 주파수 제어를 실시하지 않는 경우 시간이 경과함에 따라 목표위치 도달시간이 점차 증가되고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 제한한 알고리즘을 적용한 것으로 매 위치제어 수행전에 모터의 공진주파수를 검출한 후 새로운 주파수가 설정되도록 제어한 것이다. 이때에도 두상의 위상차는 90도로 고정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수 제어를 실시한 경우에는 시간의 변화에 따라 구동주파수가 변화하고 있으며 도달속도가 거의 저하되지 않고 있음을 보이고 있다.

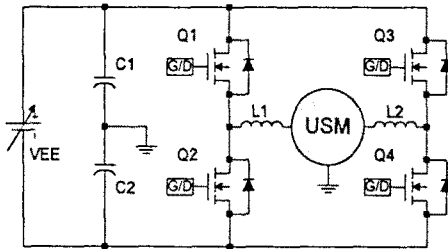


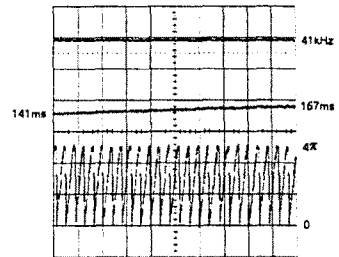
그림 5 2상 half bridge inverter의 주회로 구성
Fig. 5 Main circuit of 2-phase half bridge inverter

6. 결 론

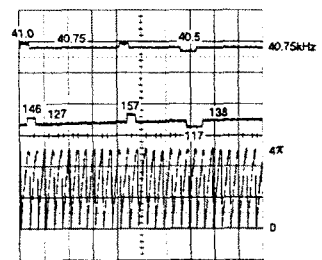
초음파 모터의 위치제어 시스템에 있어서 공진주파수의 변화로 인하여 발생하는 도달속도의 저하를 보상하기 위해 모터의 공진주파수 검출기능을 갖는 새로운 방식의 위치제어 알고리즘에 대하여 설명하였다. 제한한 알고리즘에서는 매 위치제어 시작 직전에 모터의 공진전압으로부터 현재 모터의 상태를 유추한 후 추정된 공진주파수를 새롭게 설정한다. 이에 대한 실험을 통해 알고리즘의 유효성을 조사하였으며, 실험결과 주파수를 고정하고 위치제어를 수행함으로써 온도상승에 따른 도달속도가 저하되는 현상을 극복할 수 있었다. 추후의 과제는 모터의 운전 상태에서 공진주파수의 변화를 실시간 추종하는 최대 공진전압 검출 방법이며 현재 이에 대한 연구가 준비중에 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Sashida, T. Kenjo : *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Clarendon Press, Oxford, 1993
- [2] Y. Izuno, et al., "High Performance and High Precision Ultrasonic Motor-Actuated Positioning Controller", Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.1269-1274, 1994
- [3] Y. Izuno et al., "Software-Based Adjusting PI Gain Controller for Speed Tracking Servo System using Travelling-Wave Type Ultrasonic Motor", Proceedings of IEE-PEVD, No.399, pp.554-561, Oct.1994
- [4] Y. Izuno, et al., "New Servo Control Schemes of Ultrasonic Motor using Fuzzy Reasoning", Proc. of IEE Jpn. - Industry Appl. Soc, pp.221-226, 1990 (in Japanese)
- [5] T. Senjyu et al., "Position Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network", T. of IEE Jpn., Vol. 116-D, No.10, pp.1059-1066, 1996 (in Japanese)
- [6] 김영동 외, "초음파 모터의 위상차 제어", 조명.설비학회 논문지, Vol. 10-1-5, pp.66-74, 1996년 2월
- [7] A. Kato et al., "Compliant Motion of Ultrasonic Motor by Phase Difference Control", Trans. Soc. Instrum. Control Eng., Vol.27, No.11, pp.1290-1295, 1991 (in Japanese)
- [8] S. Furuya et al., "Load-Adaptive Frequency Tracking Control Implementation of Two-Phase Resonant Inverter for Ultrasonic Motor", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.7, No.3, pp.542-550, July 1992



(1)



(2)

그림 6 초음파모터의 운전파형

(1) 주파수고정 (2) 주파수제어

Fig. 6 Waveforms of USM

- (1) Constant frequency
- (2) Control to the resonant frequency