

원자력발전소 증기발생기 세관 세정용 로봇의 고 정밀 DC모터 제어

김석곤, 김광홍, 김준홍, 조병학
 전력연구원 원자력연구실 원전계전그룹

High Precision DC Motor Control of the Lancing Robot for Steam Generator Tube in Nuclear Power Plant

Seok-Gon Kim, Kwang-Hong Kim, Jun-Hong Kim, Byung-Hak Cho
 Nuclear Power Laboratory, KEPRI

ABSTRACT

PID제어기는 구조가 간단하고 동조가 용이하며, 특성이 우수하여 산업현장에서 널리 이용된다. 본 논문에서는 LM628 모터제어기를 이용하여 원자력 발전소 증기발생기 튜브 하부에 누적되어 있는 슬러지를 제거하는 로봇의 제어특성에 대해 고찰해 보았다. 증기발생기내의 튜브는 약간의 외력에도 쉽게 손상을 입기 때문에 세정로봇에서 물을 분사할 때에는 정확한 위치제어가 요구된다. PID값과 속도, 가속도값 그리고 가변속도 등의 변화를 주었을 때, 슬러지를 제거하는 로봇 노즐부의 모터에서 발생하는 실제의 위치 및 속도, 그리고 전류값을 확인하여 시스템의 성능을 검토하였다.

1. 서 론

공작기계, 산업용 로봇 등 정밀제어에 널리 사용되고 있는 DC 서보 모터의 제어는 PID 제어가 가장 많이 이용된다. 1970년대 이후로 컴퓨터 하드웨어 기술의 급속한 발달로 인해 마이크로 프로세서의 성능이 향상되고 실시간 연산이 가능해짐에 따라 제어기를 선택하는데 있어서 아날로그 제어기를 사용하기 보다는 시스템의 설계, 확장, 수정 등에 있어서 많은 융통성과 부가기능을 부여할 수 있는 디지털제어기로 변화해 가고 있다.

여러 종류의 제어기 가운데 PID 제어기는 그 구조가 간단하고 견실하며, 특성이 좋기 때문에 산업제에 널리 이용되고 있다. PID 제어기는 원하는 특성을 얻기 위해 각 계수들이 적절하게 결정되어야 하는데, 이에 대한 방법으로는 최적화(Optimizing) 방법, 시행착오(Trial and Error)방법, 그리고 자기동조(Self Tuning)방법 등이 있다.

본 논문은 원자력발전소 증기발생기 튜브의 슬러지 세정용 로봇제어장치(Kalans 시스템)의 고 정밀

모터제어에 관하여 다루고 있다. 고압의 세정용 물을 튜브의 상, 하부 방향으로 움직이며 적절한 각도로 분사하는 노즐장치를 제어하기 위해 LM628 모터제어기를 이용 하였으며, PID 및 Acceleration (가속도), 속도(Velocity) 그리고 Speed(가변속도) 파라미터 값 등의 변화를 주었을 때, Position, Velocity, Current값이 어떤 제어특성을 나타내는지 에 대해 시행착오(Trial and Error)방법을 적용하여 고찰해 보았다.

2. KALANS 시스템 및 LM628제어기의 설계

2.1 KALANS 시스템 개요 및 구성

본 논문에서 다루는 KALANS 시스템은 원자력 발전소 증기발생기의 튜브를 고정시키는 분배 판(Distribution Plate) 위에 누적되어 있는 슬러지를

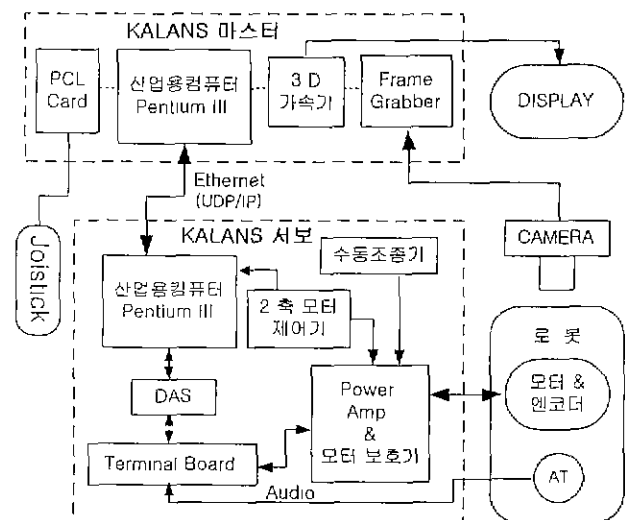


그림 1 KALANS 로봇 시스템 구성도

제거하고 세정하는 로봇의 제어를 담당하는 시스템이다. KALANS 로봇 시스템은 크게 증기발생기 세관 세정로봇을 원격으로 제어 및 감시하는

KALANS 마스터와 로봇을 구동하는 KALANS 서보로 구성된다. 마스터는 격납용기 외부의 컨테이너에 위치하고 서보는 격납용기 내부에 설치되며 이들은 컴퓨터 통신에 의해 정보를 교환한다. 마스터는 사용자 인터페이스를 위한 로봇원격제어와 감시환경을 제공하며, 서보는 2축 모터제어기와 모터 구동장치인 Power Amplifier, 모터 과전류 보호기로 구성되며, 마스터로부터의 로봇제어명령을 수행

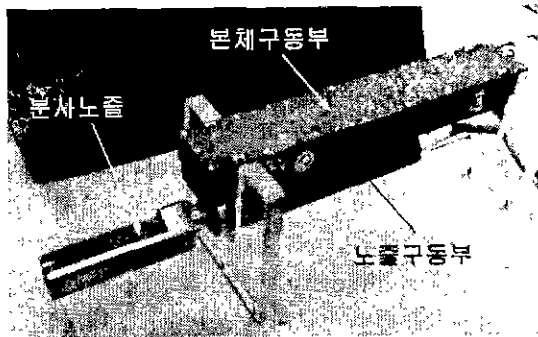


그림 2 증기발생기 세정작업용 로봇

하고 로봇 제어상태를 점검한다.

서보의 컴퓨터보드 내에는 Kepro-Robot이라는 시스템 소프트웨어가 장착되어 있으며, 이것은 주로 마스터와의 통신에 의해 로봇의 제어와 감시를 수행하지만, 별도의 사용자 인터페이스를 제공하고 있기 때문에 서보만으로도 키보드와 로봇언어 파일에 의해 로봇의 자동제어가 가능하다. 자동 운전 시에는 사용자가 Ethernet(UDP/IP) 통신을 통해 서보에 명령을 내리면, 로봇언어 번역기에서 각 모터의 회전 각도를 계산한다. 모터 제어기는 이 회전각도를 목표로 주어진 속도와 가속도로 회전을 하게 된다. 모터가 회전하면, 모터의 현재 회전 상태가 마스터에 알려진다.

2.2 로봇제어를 위한 인터페이스

로봇본체에는 로봇구동 및 튜브세정용 물을 다양한 각도로 분사하는 노즐부 구동모터와 모터의 회전축에 연결된 엔코드가 설치되어 있다. 엔코드는 모터의 회전속도에 비례하는 일련의 펄스신호를 발생하며, 회전방향을 감지하기 위해 A, B 두 상의 신호를 출력한다. 이 신호는 모터제어기에 전달되어 적분연산을 거쳐 실제의 모터 회전수와 각도를 계산하는 데 사용된다.

모터 제어기에는 2개의 모터를 동시에 제어하기 위해 2개의 LM628 모터제어 전용 DSP칩이 내장되어 있고 2개의 릴레이 출력과 2개의 디지털 입력이 설치되어 있다. LM628은 모터의 회전위치는 물론, 속도와 가속도를 사용자가 원하는 대로 정확히 제어하도록 프로그램 되어 있으며, 모터제어기의 현재상태를 Kalans 마스터부에 제공하여 사용자가 쉽게 운전상태를 파악할 수 있는 환경을 제공한다.

2.3 LM628 모터제어기의 동작원리

2.3.1 Trajectory Generation

LM628 모터 제어기는 다양한 종류의 DC 및 BLDC(brushless DC) 서보 모터를 제어하기 위해 고안된 Motion-Control 프로세서이다. 아래의 [그림3]은 LM628을 사용한 서보 시스템의 구축을 설명하고 있다. Host Processor는 I/O Port를 통해

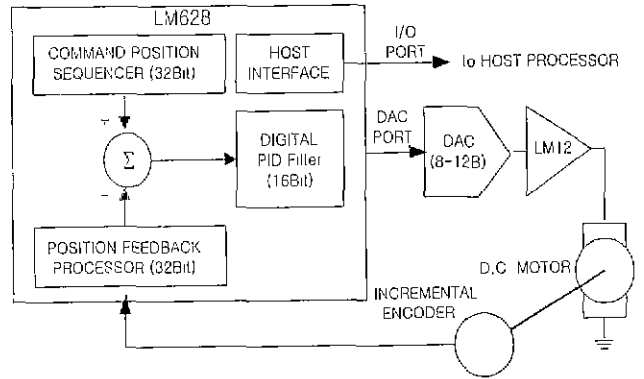


그림 3 LM628 System Block Diagram

LM628 모터 제어기와 통신한다. Incremental Encoder는 LM628제어기에 서보의 Position에 관한 Feedback 정보를 제공한다.

동작 중에 있는 LM628 모터 제어기는 원하는 위치(Profile Generator Position)로부터 실제위치(Feedback Position)를 뺄셈한다. 이렇게 하여 결과적인 Position Error는 모터를 원하는 Position으로 구동하기 위해 Digital PID Filter에 의해 처리되어 진다.

2.3.2 Position 궤환 인터페이스 및 속도궤적 생성

LM628 모터제어기는 Incremental Encoder를 통해 모터로부터 Position 정보를 입력받는다. 두 개의 구형과 신호입력과 1개의 Index Pulse 입력이 제공되어지며, 구형과 입력이 한번 발생할 때마다 Logic 변이가 발생하며, 이와 함께 LM628 내부 Position Register가 증가하거나 감소한다.

Trapezoidal Velocity 궤적 생성기는 시간(Time)에 대한 모터의 원하는 위치를 계산한다. 위치제어

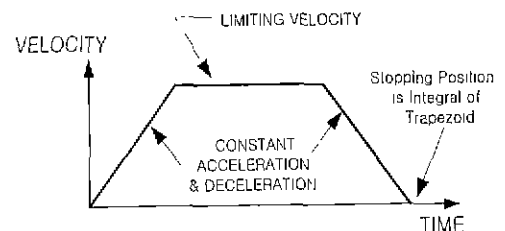


그림 4 전형적인 Trapezoidal 궤적

모드 일 때, Host Processor는 Acceleration, 최대 Velocity, 그리고 Final Position을 정의한다. LM628 모터제어기는 이 정보를 사용하여 모터가

최대속도에 도달할 때까지 특정속도로 가속함으로 모터의 움직임에 영향을 미치며, 또한 목표로 하는 최종 위치(Position)에서 정지하도록 감속을 하는 동안에도 모터가 움직이며, 감속율(Deceleration Rate)은 가속율(Acceleration Rate)과 동일하다. 최대속도로 움직이는 동안, 어느 시간에서 Target Position은 변경될 수 있으며, 모터는 이에 따라 가속하거나 감속할 것이다. 속도제어 모드에서 동작 중일 때, 모터는 특정 가속율(Acceleration Rate)에서 특정속도에 도달할 때까지 가속하며, 정지명령이 주어질 때까지 특정속도를 유지한다.

2.3.3 Trajectory Parameter 계산

Acceleration(A) 및 Velocity(V), Position(P)값의 계산은 아래와 같다.

$$A = RC T^2 A_{ad} [cnts/sample^2] \quad (1)$$

R : 각 Revolution당 Cycle 수

C : 각 Cycle당 Count 수

T : Sample 당 주기(256 μs)

A_{ad} : 사용자가 원하는 가속치(rev / s^2)

$$V = RCT A_{vd} [cnts/sample] \quad (2)$$

A_{vd} : 사용자가 원하는 속도치(rev / sec)

$$P = RC r [cnts] \quad (3)$$

r : Revolution 값 (revs)

본 실험에 사용된 LM628 모터 제어기의 R 값은 180 [Cycles/rev]이며, C 값은 4 [Cnts/Cycle]이다.

2.4 PID Compensation Filter

LM628 모터 제어기는 제어루프를 보상하기 위해 디지털 PID(Proportional Integral Derivative) 필터를 사용한다. 모터는 Position Error에 비례하는 복원력(Restoring Force)을 모터에 인가함으로써 원하는 Position을 추종하며, 이 모터제어 출력신호는 Position Error의 값에 Error의 적분값과 Error의 미분값을 가산한 값이다.

아래의 Discrete-Time 방정식은 LM628 모터제어기에 의해 수행된 제어를 설명하고 있다.

$$U(n) = K_p E(n) + K_i \sum_{N=0}^n E(n) + K_d [E(n') - E(n'-1)] \quad (4)$$

n, n' : Sample Time

$U(n)$: n 에서의 모터제어 신호출력

$E(n)$: n 에서의 Position Error

K_p, K_i, K_d : Discrete-Time Filter Parameter

식 (4)에서 첫 번째 항인 비례항은 Position Error에 비례하는 복원력을 제공한다. 두 번째 항인 적분 항에서는 시간에 따라 증가하는 복원력을 제공하며, 최종적으로 정적인 Position Error가 Zero가 되도록 한다. 만약,

여기에 일정한 Torque가 실려 있다면, 모터는 여전히 Position Error를 Zero로 유지할 수 있을 것이다. 세 번째 항인 미분항은 Position Error의 변화율에 비례하는 힘을 제공한다. 미분항과 관련된 Sampling 간격은 사용자가 선택 가능하며, LM628 모터제어기가 광범위한 내부 Load를 제어할 수 있게 한다.

본 논문에서는 LM628제어기의 특성을 얻기 위해 각 계수들을 결정하는데 있어서 Trial & Error 방법을 이용하여 실험을 실시하였다.

3. 실험 방법 및 결과

3.1 실험방법 및 DC 모터 특성

본 논문에서는 LM628 PID 모터 제어기의 성능과 신뢰성을 실험하기 위해, 속도 및 위치의 제어와 관련하여 PID값 및 Acceleration값, 그리고 Speed 파라미터 값 등의 변수들을 입력하고, 이 과정을 통해 얻은 값을 시간에 따른 궤적(Profile)으로 나타내었다. 본 실험에서는 세정작업용 로봇내에 설치되어 있는 두 개의 모터 가운데, 노즐부의 모터구동에 관한 제어특성에 대해 알아보았다. 아래의 내용은 노즐 구동부에 내장되어 있는 DC 모터 및 기어헤드의 특성을 나타낸 것이다.

* 제작사 : FAULHABER / Switzerland

* 모델명 : Minimotor SA 38/2S

* 기어제질 및 기어 비(ratio) : Steel / 989 : 1

* 연속동작 위한 최대 입력 Speed : 4,000 [rpm]

* 연속동작 위한 최대 출력토크 : 10 [Nm]

* 효율 : 55 %

3.2 실험결과

[그림5]와 [그림6]은 PID값과 Velocity값을 동일 ($P=0 \times 8, I=0 \times 8, D=0 \times 1, Velocity=0 \times D0000=851,968$) 하게 하고 Acc.값 및 Speed값을 다르게 했을 경우의 실험결과이다.

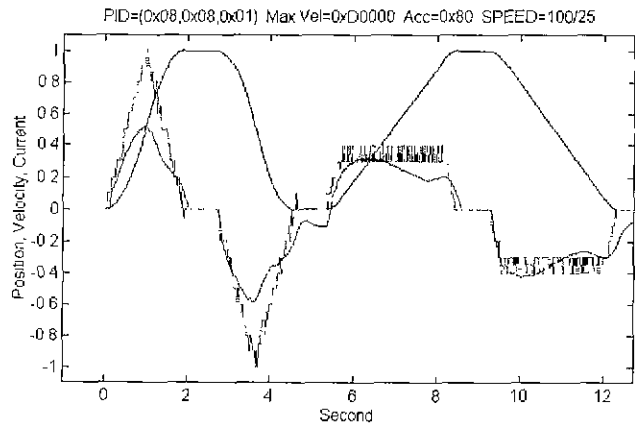


그림 5 Low PID value를 적용한 Trajectory Profile
그림에 나타난 Profile 가운데 큰 산 모양을 이루

는 실선(Blue)이 Position이며, 많은 잡음이 포함되어 있는 꺾은선이 속도(Green)이고 나머지 속도꺾은선과 함께 움직이는 실선(Red)이 전류 값이다.

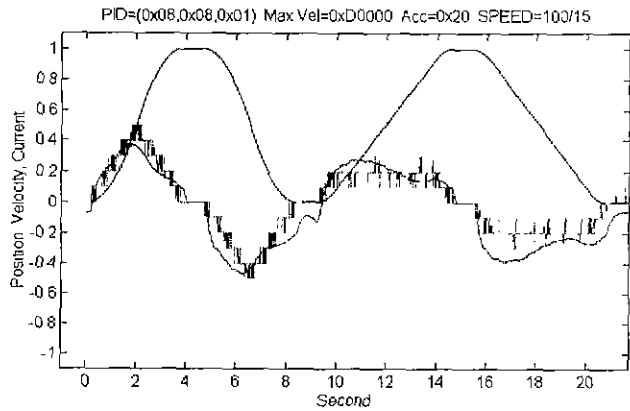


그림 6 High PID value를 적용한 Trajectory Profile

[그림7]과 [그림8]은 Velocity값과 Acc.값 및 Speed값을 동일(Velocity=0xD0000=851,968, Acc.=0x80, Speed=100%/25%)하게 하고 PID값을 다르게 했을 경우의 실험결과이다. 실험결과를 관찰해 보면, PID 값이 지나치게 크거나 적지 않고 Acc.값이

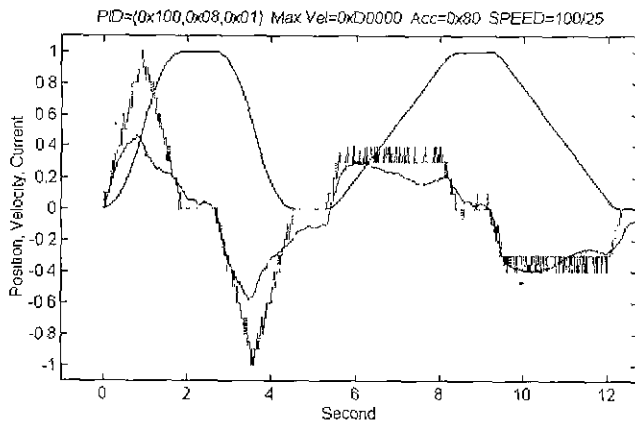


그림 7 Low Acc./Speed value를 적용한 Trajectory Profile

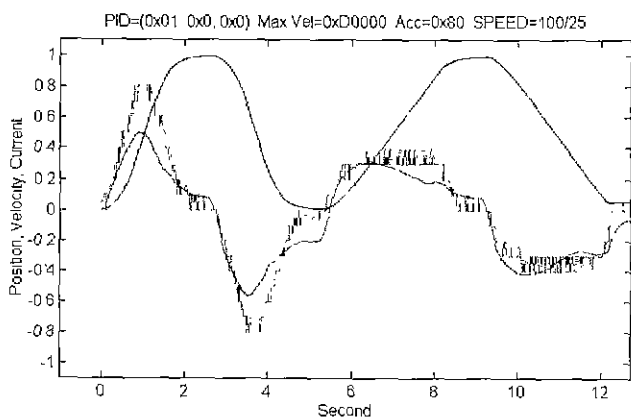


그림 8 High Acc./Speed value를 적용한 Trajectory Profile

너무 큰 경우에는 Speed의 순간 전류 값이 현저히 큰 것을 알 수 있으며, Acc.값 및 Speed값에 비해 PID값이 너무 크거나 적을 경우(그림7 과 그림8)에는 모터가 정지했을 경우, 노즐 구동전류의 특성이 매우 불안정해 지는 것을 볼 수 있다. 이는 모터 축 중심에 대해 노즐의 기하학적 형상이 비대칭이기 때문에 노즐 분사 구의 위치에 따라 노즐의 무게중심이 변하며, 따라서 모터를 구동하는데 필요한 전류의 세기가 모터의 회전속도, 구동/정지 위치 등에 따라 달라졌기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 LM628 모터제어기를 이용하여 원자력발전소 증기발생기 세정작업용 로봇의 노즐 구동부를 PID 및 Acceleration, 그리고 Speed 파라미터 값의 변화를 주었을 때, Position, Velocity, Current값이 어떤 제어 특성을 나타내는지 알아보았다. 앞 절에서 이미 서술한 바와 같이 분사 노즐부의 축 중심에 비해 비대칭적인 형상이 외란으로 작용하여 구동전류의 불안정성을 가져왔다. 노즐의 무게가 축 중심을 기준으로 올라 갈 때와 내려 올 때가 다르며, 고속으로 급 구동을 시키는 경우에 모터 축에 걸리는 부하가 많기 때문이다.

증기발생기 튜브의 세정 작업시, 분사노즐의 회전속도는 고속을 필요로 하지 않는다. 따라서 LM628 제어기는 세정작업용 노즐의 회전속도에 대해서는 매우 좋은 결과를 보였다. 그러나, 이와 연계하여 분사노즐에 실제로 물을 분사할 경우에 PID제어기의 Tuning에 대한 연구가 매우 중요한 것으로 생각되며, 이에 대한 연구를 차기에 수행해 보고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Astrom and B. Wittermark, "Computer Controlled Systems Theory and Design", Prentice-Hall Inc., N J., 1984
- [2] P. C. Sen and M.L. Macdonald, "Thyristorized DC Drives with Regenerative Braking and Speed Reversal", IEEE Trans. Ind. Electr. Instrument, vol IECI-23, no 4, 1978
- [3] C. D. Dicenzo, B Szabados, and N.K. Sinha, "Digital Measurement of Angular Velocity for Instrumentation and Control", IEEE Trans. Ind. Electr. and Control Instrum., vol. IECI-23, no.1, 1976
- [4] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of PID Controllers", ISA, Research Triangle Park, North Carolina, 1988
- [5] "델타60형 증기발생기 슬러지 세정용 로봇 제어장치 개발 중간보고서", 전력연구원, TM, 2000