

LQG Regulator를 이용한 속도센서없는 직류서보전동기의 속도제어에 관한 연구

김 상훈\* 고 봉운 남 문현 김 낙교  
 건국대학교 전기공학과

A study on the control of speed-sensor less DC servo motor using LQG Regulator

Sang-Hoon Kim\* Bong-Woon Ko Moon-Hyun Nam Lark-Kyo Kim  
 Department of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

**Abstract** - The LQG regulator presented in this dissertation is designed to improve system stability with the structure in which Kalman Filters and LQ regulator are inter-connected to avoid disturbances on the system. For the sake of performance evaluation of the LQG regulator in this dissertation, the regulator is put in use for the speed control of DC Servo Motors without speed sensors on them to realize speed control without sensors by estimating uncertain speed with its state signals and to construct an optimal controller using the LQG regulator.

Furthermore, state estimation process with white noise entered onto the systems is been experimented through a series of simulation. As a consequence, the process of estimating speed signals out of the signals with white noise inputs is confirmed using Kalman Filter.

1. 서 론

직류서보전동기는 구조가 간단하고 효율이 좋으며 제어기가 간편하여 현대 산업사회에서 많이 사용되고 있으며 이러한 직류서보전동기의 속도제어를 위하여 필요한 속도정보를 얻기 위하여 리졸버(Resolver)나 엔코더(Encoder)와 같은 센서를 사용한다. 이들 센서로 전동기의 회전을 전기적인 신호로 변환하여 속도 정보를 얻을 수 있게 된다. 하지만 이들 속도 센서들은 전동기 운전 중에 여러 가지 문제를 일으킬 수 있고, 적용함에 있어 제한을 받게 된다. 즉, 직류전동기와와 커플링 문제, 또한 설치 환경에 민감하여 신뢰성이 떨어질 수 있으며, 무엇보다도 전체 시스템의 가격을 상승시킬 수 있다[1][2][3]. 따라서, 직류전동기를 사용함에 있어서 속도 센서를 붙이지 않고 제어를 수행하는 것이 유리하며 이를 위해서 많은 연구가 수행되어지고 있으며, 일반적으로 MRAS(Model-reference adaptive system)제어기법과, 관측기 등이 많이 사용되고 있다. 기준모델 적응제어 기법은 기준전류 추정 시 순수적분문제와 파라미터의 변동문제에 의해, 특히, 저속상태에서는 속도오차를 발생하며, 전차수 관측기는 비선형요소 발생시 관측기 이득조정 등에 있어서 많은 어려움이 발생하게 된다[4][5][6]. 최근에는 환경의 변화와 시스템의 비선형성에 대응하기 위한 적응제어(Adaptive control) 및 지능제어(Intelligent control) 기법이 많이 사용되고 있으나, 이러한 제어기법들은 제어알고리즘이 복잡하며 많은 제어량이 요구되어 실시간 제어에 많은 어려움이 따른다. 따라서, 현재 이러한 방식을 개선하기 위하여 많은 연구자들은 최적제어 이론을 도입하고, 현대제어 이론인 상태방정식에 의한 시스템 표현을 근간으로 한 최적제어(Optimal control) 설계기법을 도입하였다[7][8]. 최적제어이론에 기반을 둔 LQ 제어방법을 사용하여 시간영역에서의 다변수 제어

시스템을 설계할 수 있게 되었지만 이 방법은 시스템의 모든 상태변수들을 측정해야 하기 때문에 현실적으로 제한을 받는 경우가 많았다. 그리하여 이점을 보완하기 위해 최적추정이론을 도입한 LQG(Linear Quadratic Gaussian)제어방법이 도입되었다. 시스템의 수학적인 모델은 실제 시스템을 정확하게 계산할 수 없으므로 항상 모델링오차가 존재하게 된다. LQG Regulator는 안정도-강인성을 고려한 제어시스템을 설계하는데 그 목적을 두고 있다[9].

이것은 외란 및 측정잡음이 실제 혹은 가상적인 확률 입력(stochastic input)으로 주어지고, 이 확률에 대한 칼만 필터가 설계되고, LQ 최적제어 문제를 해결함으로써 시스템의 안정도와 수학적으로 정의된 평가 함수를 최적화하는 동적 피드백 제어 시스템을 설계하는 방법이다. LQG제어 시스템은 만일 시스템이 안정가능하고 검출가능하다면 모든 상태변수를 측정할 필요 없이 실질적으로 측정할 수 있는 상태만을 이용하여 설계할 수 있고 수학적으로 그 안정성이 보장된다[9].

본 논문에서는 이러한 LQG regulator에 의한 최적제어 이론을 센서없는 직류서보전동기에 적용하여, 칼만 필터를 이용하여 속도추정을 하였으며 LQG Regulator를 이용하여 최적 제어를 구현하였다. 그리고, 가장 보편적인 제어방법인 센서를 통한 제어방법과 비교실험을 수행하며 LQG Regulator를 사용한 센서가 없는 제어방식이 센서를 통한 제어방식과의 유사한 특성을 나타내었음을 입증하였다.

2. LQG 제어기의 설계

2.1 LQG 제어기

잡음이 섞인 시스템의 측정값으로부터 칼만필터를 이용하여 상태의 추정자를 구하고, 이를 LQ조정기의 상태변수 대신에 사용하는 형태의 제어기를 LQG 제어기(linear quadratic Gaussian controller)라고 한다. 즉, LQG 제어기는 LQ 조정기와 칼만필터가 결합된 형태라고 할 수 있다. LQG 제어기 문제에서는 대상 시스템을 다음과 같은 상태공간 모델로 표현한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + G(t)w(t) \tag{2-1}$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t)$$

위의 시스템에 대해 최적제어벡터를

$$u(t) = -Kx(t) \tag{2-2}$$

라 하고, 여기에서 최소화시킬 성능지표는 다음과 같다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \right\} \tag{2-3}$$

LQG 제어기 설계 문제는 두 가지의 독립된 단계로 나누어 풀 수 있다. 즉, LQ조정기 문제를 풀어서 최적의 상태 추정치를 계산한 후, LQ조정기의 상태변수 대신에 상태추정치를 대입하여 사용하면 된다. LQG 제어기에서는 설계변수가  $Q, R, Q_0, R_0$ 의 네 가지이다. 이 값들을 적절히 선택하여 시스템이 원하는 성능을 갖도록 제어기를 설계한다. 시스템의 수학적인 모델은 실제 시스템을 정확하게 계산할 수 없으므로 항상 모델링오차가 존재하게 된다. LQG Regulator는 안정도-강인성을 고려한 제어시스템을 설계하는데 그 목적을 두고 있다. 이것은 외란 및 측정잡음이 실제 혹은 가상적인 확률입력(stochastic input)으로 주어지고, 이 확률에 대한 칼만 필터가 설계되고, LQ 최적제어 문제를 해결함으로써 시스템의 안정도와 수학적으로 정의된 평가 함수를 최적화하는 동적 피드백 제어 시스템을 설계하는 방법이다. LQG제어 시스템은 단일 시스템이 안정가능하고 검출가능하다면 모든 상태변수를 측정할 필요 없이 실질적으로 측정할 수 있는 상태만을 이용하여 설계할 수 있고 수학적으로 그 안정성이 보장된다.

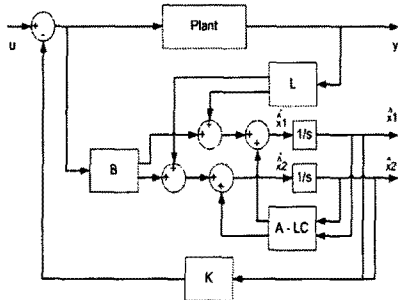


그림 1 LQG 제어기 구성도  
Fig. 1 Structure of LQG controller

## 2.2 실험 및 고찰

본 논문에서는 비선형제어기의 설계를 위하여 일반적으로 수학적 모델링과 선형화가 잘 이루어진 직류 서보 전동기의 센서없는 속도제어를 위해 LQG regulator를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 가지고 LQG regulator의 센서없는 속도 추정능력 및 최적 제어기 구현을 비교하기 위해 센서를 장착한 시스템과 동일한 조건하에서 PID 제어기와 비교실험을 수행하였다.

### 2.2.1 실험장치구성

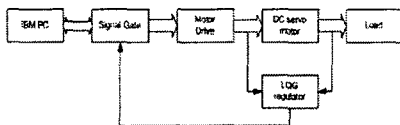


그림 2 실험장치 구성도  
Fig. 2 Experimental system configuration

그림 2은 실험장치 구성도를 나타낸 것이다. 또한 제작된 디지털 서보 시스템은 고성능 마이크로 프로세서인 H8/532를 적용한 것으로 PWM주파수는 6.7[kHz]이며 PWM펄스의 조정에 따라 전동기에 공급되는 전류를 조절하여 전동기의 회전을 제어하는 방식이다 전동기의 구동을 위한 증폭은 MOS-FET를 사용하고 별도의 전원

공급기(최대 75V)를 통해 전동기를 구동하게 된다. 디지털 서보 시스템은 IBM-PC에서 프로그램 작업과 디버깅을 수행하고 병렬 포트를 통해 서보 전동기 구동회로로 다운로드 되도록 구성하였다.

본 실험에서 사용한 전동기는 최대출력 200W(LG기전, FMD-E205A)이며 속도추정을 위한 센서로 1000[펄스/회]의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다. 속도추정을 위한 전류는 직류전동기에 인가되는 전류를 사용하여 관측기를 통하여 추정속도가 계산되어 진다.

### 2.2.2 실험결과

#### [1] 계단입력실험

그림 3, 4는 직류 서보 전동기의 계단 입력시 출력속도를 센서있는 PID 제어기와 센서없는 LQG regulator와 비교 실험을 한 것이며 실험결과는 표 1와 같다.

표 1 계단입력 실험결과

Table 1 Experimental result

	정착시간 [sec]	최대출력 [rpm]	오차(%)
PID 제어기	0.65	3005	0.17
LQG Regulator	0.69	3013	0.43

표 1의 결과와 같이 계단입력실험에서의 출력응답은 기준입력과의 오차에서 PID제어기가 LQG Regulator에 비해서 약 0.26%정도 크게 나타났으며 정착시간에 있어서도 기존 PID 제어기가 LQG Regulator에 비해 약 0.04초 정도 빠르게 나타났다.

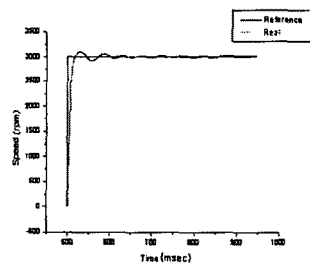


그림 3 센서를 이용한 계단입력  
Fig. 3 Step input using speed sensor

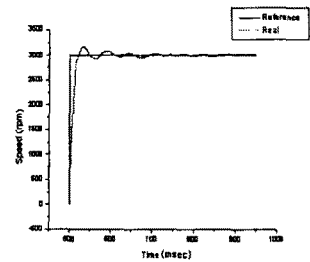


그림 4 센서없는 LQG 제어기를 이용한 계단입력  
Fig. 14 Step input using Sensorless LQG regulator

#### [2] 정역운전 실험

그림 5, 6는 직류서보 전동기의 정역 회전의 출력응답을 PID제어기와 LQG regulator와 비교 실험한 것이며, 실험결과는 표 2과 같다.

표 2 정역회전 실험 결과

Table 2 Experimental result

		정역전 [rpm]	역회전 [rpm]	오차 (%)
PID 제어기	1st	3004	3002	0.13
	2nd	3004	3003	0.1
LQG Regulator	1st	3130	3081	4.3~2.7
	2nd	3092	3065	3.0~2.2

표 2에서의 결과와 같이 정역회전 운전시에는 LQG Regulator가 PID 제어기에 비해 기준입력과의 오차가 약 3~4%정도 더 많이 발생하였다. 그러나, 첫 번째 정역운전 보다 두 번째 정역운전에서는 LQG Regulator가 최적화에 의해 약 1.5~2%정도 오차가 감소되었다.

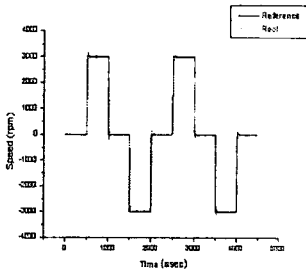


그림 5 센서를 이용한 정역회전

Fig. 5 Clockwise & counterclockwise revolution using sensor

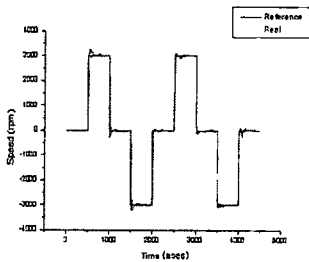


그림 6 센서없는 LQG 제어기를 이용한 정역회전

Fig. 6 Clockwise & counterclockwise revolution using sensorless LQG regulator

### 3. 결론

본 실험을 통하여 상태관측을 이용한 직류서보 전동기의 센서없는 속도제어를 구현하였고, 또한 LQG 제어기를 이용하여 최적의 제어기를 구현하였다.

제어기설계 시 제어이득  $K$ 와 필터이득  $L$ 을 구하기 위해 하중치  $Q, R, Q_0, R_0$ 를 설정하는데는 상당한 경험을 필요로 하며 시행오차방법으로 설정해야 한다.

본 논문에서는 임의로 하중치를 설정하여 시뮬레이션함으로써 조절하였다. 또한 LQG regulator는 시스템의 모든 상태를 관측할 수 있다는 전제 아래 행해지기 때문에 측정할 수 없는 상태는 측정 가능한 정보에서 추정해야만 한다.

칼만 필터는 외란이나 측정 노이즈가 신호도 필터링하여 실제신호를 찾아낼 뿐아니라 다른 신호도 추정해 낼 수가 있는 하나의 관측기이기도 하고, 또한, 칼만 필터의 다른 특징인 noise 처리 능력을 입증하기 위해, 시스템에

백색잡음을 입력하여 상태 추정의 결과를 확인하였다. 이에 칼만 필터로 백색잡음이 혼입된 위치신호를 추정할 뿐아니라 속도를 추정해내는 결과를 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

따라서 본 논문에서는 이러한 칼만 필터의 특징을 살려 직류서보전동기의 센서없는 속도제어에 이용하여, 미지의 속도를 상태신호로 추정하여 센서없는 속도제어를 구현하였고, 또한 이를 최적제어인 LQG 제어에 이용해 최적제어기를 구성하였으며 본 논문에서 설계한 LQG Regulator의 성능을 입증하기 이를 센서없는 직류 서보 전동기의 속도제어에 적용하고, 동시에 가중치 행렬  $Q$ 과  $R$  그리고, 칼만 필터 이득  $Q_0$ 와  $R_0$ 의 선정에 따른 최적 상태의 제어기를 구성하여 PID제어기와 비교실험을 행하였다. 이에 계단입력실험, 정역회전실험에서는 센서 있는 PID 제어기와 센서없는 LQG Regulator가 약 1~5%정도의 오차를 보여 LQG Regulator의 센서없는 직류 서보 전동기에서의 속도제어에서 속도추정 성능을 실험하여 관측기로서의 성능을 입증하였다.

본 논문에서 설계한 센서없는 LQG Regulator의 실용화를 위해서는 성능-강인성과 안정도-강인성의 문제에 관해서도 보다 집중적인 노력이 필요하며, 또한 좀더 복잡한 시스템과 잡음환경에서의 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Cheng-Hung Tsai, Hung-Ching Lu, Observer-Based Speed Estimation Method for Sensorless Vector Control Using Artificial Neural Network, Electric Machines and Power systems, 28:861-873, 2000.
- [2] Zhiqian Chen, New Adaptive Sliding Observers for position and Velocity-Sensorless controls of Brushless DC Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.3, June 2000
- [3] T.Ohtani, N.takada and K. Tanaka, "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder", IEEE IAS. Ann. Mtg., pp.500-507, 1989.
- [4] Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.29, No.2, Mar., pp.344-348, 1993.
- [5] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motor without Rotational Transducers", in proc. IAS Ann. Mtg., pp.498-499, 1989.
- [6] L.C.Zai and T. A. Lio, "An Extended Kalman Filter Approach to Drives", IEEE IAS Ann Mtg., pp.177-183, 1987.
- [7] Karl Johan Astron & Biron Wittenmark, "Adaptive Control", Addison-Wesley Publishing Co., LTD., 1989.
- [8] Chi-Tsong Chen, "Linear System Theory and Design", CBS College Publishing, 1984
- [9] L. C. Kramer and M. Athans, 1974, "On the application of Deterministic optimization Methods to Stochastic Control Problems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-19, No.1.