

외란 전향 보상을 이용한 관성 추정기 및 효율적인 외란 관측기에 대한 연구

조용규, 김민영, 김준석
인천대학교 공과대학 전기공학과

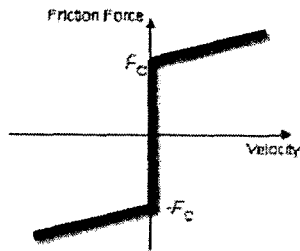
A Study On Moment Estimator Using Disturbance Feedforward Compensator And Effective Disturbance Observer

Yong-Gyu Cho, Min-Young Kim, Joohn-Sheok Kim
Dept. of Electrical Eng, University of Incheon

Abstract - 선형전동기와 같은 선형운동을 하는 기기에서 원형운동을 하는 경우 속도가 0이 되는 부분에서 비선형적인 마찰력이 작용하며 이로 인한 운동패적의 외곡 현상이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 마찰력을 비롯한 모든 외란을 하나의 비선형적인 외란으로 간주하여 실용적으로 사용할 수 있는 간단한 형태의 외란 관측기를 제시한다. 또한 모든 외란 관측기에서 피할수 없는 문제의 하나인 전동기 관성(모멘트)의 변동 문제를 해결하기 위하여 제한적이지만 매우 효과적으로 관성을 추정해낼 수 있는 새로운 방법을 제안한다.

1. 서 론

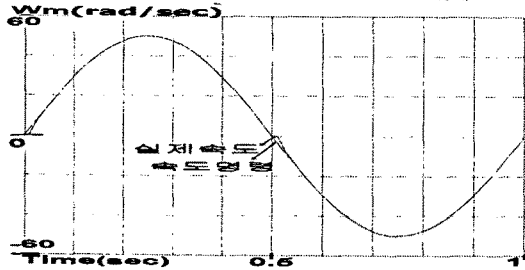
XY 스테이지와 같이 선형 보간 기법을 이용하여 궤적운동을 하는 기기에서 원형 운동을 하는 경우 속도가 0이 되는 부분에서는 비선형적인 마찰력이 존재한다. 이러한 마찰력은 일반적으로 속도 및 속도의 부호에 대한 함수이며 대부분 그림 1과 같이 쿨롱마찰력(Coulom Flicion) 과 속도에 대한 1차 함수인 점찰력(Biscouse Flicion)의 합성형태로 표시된다. 이러한 마찰력은 대부분 전동기의 이송부와 고정부를 연결하는 선형 가이드 및 베어링 사이에서 발생



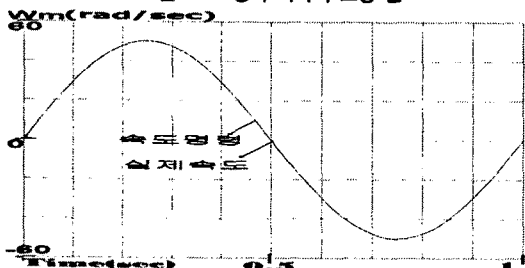
<그림 1> 마찰력 모델

하며 통상적으로 회전운동만하는 회전기에 비교할수 없이 큰 값을 갖는 경우가 대부분이다. 이러한 비선형적인 마찰력은 제어기의 제어 성능에 큰 영향을 미치는 경우가 대부분이며 이 영향을 근본적으로 제거하는 유일한 방법은 마찰력을 실시간으로 추정하여 전향 보상함으로써 제어기에서 비선형적으로 작용하는 요소를 제거하는 것 뿐이다. 그림 2a 에는 원형운동에서 발생하는 마찰력의 영향이 도시되어 있다. XY스테이지의 한축의 궤적에 대한 시뮬레이션이며 XY스테이지의 원운동을 가정하여 정현파 형태의 궤적을 발생시킨 것이다. 보이는 바와 같이 속도가 0이 되는 부근에서 그림1의 비선형 마찰력이 작용하여 실제속도가 왜곡되는 현상을 볼수 있다. 그림 2b 에는 본 논문에서 제시하는 방법으로 외란을 추정하여 전향보상한 경우의 궤적이 도시되어 있으며 약간의 지연현상이 발생하지만 속도 궤적이 거의 완전한 정현파 형태가 됨을 알수 있다.

이러한 마찰력에 의한 외란을 추정하기위해서 과거에도 많은 연구가 이루어져 왔으며 그 대표적인 예로서, 전차원 관측기 형태의 외란 추정기[1] 및 마찰력을 외란으로 간주하여 구성한 비선형 관측기[2], 슬라이딩 모드



<그림 2.a> 위치 마찰력 보상 전



<그림 2.b> 위치 마찰력 보상후

관측기를 이용한 관측기[3]등이 큰 주류를 이루고 있었다. 또한 외란 관측기에 있어 중요한 파라미터인 관성을 칼만 필터 형태의 관성 추정기[4]와 축소차원 관측기 형태의 관성 추정기[5]등의 기법들이 이용되었다. 이러한 관측기들은 그 나름의 특색이 있으며 대부분 비교적 정확한 외란 및 마찰력 추정이 가능하다는 장점이 있으나 대부분 구성이 복잡하여 실용화시키기 어렵다는 문제가 있다. 또한 관측기에서 필수적인 파라미터인 관성 정보에 문제가 있는 경우 하나도 빠짐없이 전혀 다른 외란이 추정됨으로써 유효한 정보로 활용할수 없기 때문에 실용적인 적용이 매우 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 복잡한 연산을 제거하여 실용적으로 사용할수 있는 간단한 구조의 외란 관측기를 제시하고 모든 외란관측기의 문제점인 관성의 변동을 추정할수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 관성 추정 알고리즘은 주기적으로 일종의 테스트 신호를 발생해야하는 문제가 있지만 그 성능 및 효율성이 매우 우수하기 때문에 운전 택타임(Tack-Time) 사이 사이에 적용할수 있는 경우 짧은시간내에 가장 안전하게 하는 관성을 추정할수 있는 방법을 제공한다.

2. 외란 관측기와 관성 추정기

2.1 기계 시스템 모델링

다중 관성계를 제외한 모든 기계 시스템은 외부에서 제공되는 외란 및 비선형 마찰력에서 발생하는 외란을 포함하여 하나의 통합적인 외란을 갖는 시스템으로 가정할수 있으며 이때 다음과 같이 간단한 기계방정식으로 표현된다

$$T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + T_D \quad (1)$$

여기서 ω_m 은 기계적인 각속도, T_e 는 구동토크, T_D 는 전-외란(Total Disturbance) 토크, J_m 은 기계적 관성을 표시한다. T_D 는 부하토크와 외란토크, 그리고 마찰력 모두를 외란으로 간주한 값이며 일반적으로 동적변화가 없는 ($dT_D/dt=0$)모델로 간주하지만 실제적으로는 그렇지 않고 비선형적이 동적 운동방정식을 갖는 잘 알수 없는 값으로 간주해야 한다.

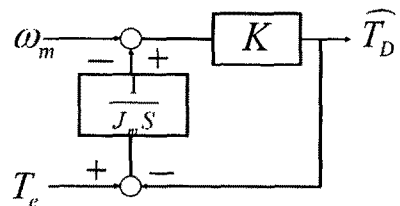
2.2 간단한 외란 관측기의 구성

일반적인 관측기 구성 방식을 도입하여 수식(1)에서 다음과 같은 매우 단순한 형태의 외란 관측기를 구성 할수 있다.

$$\hat{T}_D = \hat{J}_m \frac{d\omega_m}{dt} - T_e + K(\hat{\omega}_m - \omega_m) \quad (2)$$

$$\dot{\hat{\omega}}_m = \frac{1}{\hat{J}_m S} (T_e - \hat{T}_D) \quad (3)$$

\hat{J}_m 은 외란 관측기에서 사용하는 관성 파라미터이며 \hat{T}_D 은 추정된 외란을 의미 한다. K는 관측기 변수이며 관측기 이론에 따라 양의 값을 갖는 경우 어떠한 경우에도 안정된 추정이 가능하다. 위 (2)(3)을 구현한 외란 관측기가 그림.3에 도시되어 있다.



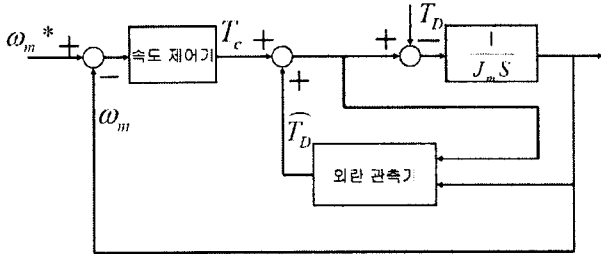
<그림 3> 제안된 외란관측기

이때 \hat{J}_m 이 실제 관성과 같다면 위의 관측기 시스템의 전달함수가 다음과 같이 표시되며 이는 수식(1)에서 T_L 을 그대로 연산하여 저역통과 필터를 적용한 시스템이 된다는 것을 볼수 있다.

$$\widehat{T}_D = \frac{w_c}{s + w_c} (T_e - \widehat{J}_m \frac{d\omega_m}{dt}) \quad (4)$$

단, $w_c = K / \widehat{J}_m$.

따라서 이와 같은 간단한 모델만으로도 미분기를 전혀 사용하지 않고 간단한 연산만으로도 매우 효율적으로 모든 부하의 변동을 추적할 수 있다. 또한 다른 관측기와 달리 복잡한 관측이득 설정이 필요없으며 원하는 동적변동에 대하여 적절한 저역통과 필터 주파수를 구성하는 양의 정수 K만을 설정하면 관측기 구성이 끝난다.



〈그림 4〉 전체 시스템 구성도

2.3 효율적인 관성 추정기

문제는 제시된 관측기에서도 기존의 모든 관측기에서와 동일하게 어쩔 수 없이 관성계수를 사용한다는 것이며 관성계수가 변동하거나 잘못알고 있는 경우 추정된 값에 매우 큰 오차가 발생한다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 별도의 관성추정 알고리즘을 도입해야하며 간단하면서도 가급적 실시간 사용이 가능한 형태이어야 유용하게 적용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 목적에 부합할 수 있는 매우 간단한 형태의 관성계수 추정 알고리즘을 도입하였다. 우선 관측기에서 발생하는 모든 오차는 관성의 변동에 의해 발생한다고 가정하였으며 관성의 변동이 미치는 영향을 분석하기 위해 식(1)과 식(4)를 조합하여 다음의 수식을 도출하였다.

$$\widehat{T}_D = \frac{w_c}{s + w_c} (T_e - \frac{J_m}{\widehat{J}_m} (T_e - T_D)) \quad (5)$$

이때 $(J_m / \widehat{J}_m) \equiv \alpha$ 라고 설정하면 $\alpha = 1$ 일때 즉 관성을 정확하게 아는 경우에는 K를 크게함으로써 정확한 외란을 추정할 수 있다. 그림.4에 도시되어 있는 바와 같이 외란을 전향보상하는 제어기에서 제어 수행중에 매우 짧은 시간동안(약0.01초) 제어기의 출력을 0으로 설정하면 전동기에 인가되는 토크는 오직 추정된 외란토크 \widehat{T}_D 만이 존재하며 ($T_e = \widehat{T}_D$), K가 비교적 크다는 가정을 하면 수식(5)는 다음과 같이 되어 기술된다.

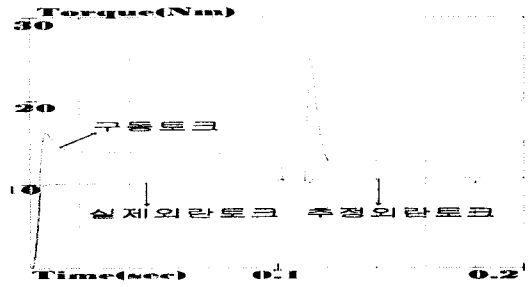
$$\widehat{T}_D \approx T_e - \alpha (T_e - T_D) \Leftrightarrow (T_e = \widehat{T}_D) \quad (6)$$

즉, α 에 무관하게 $\widehat{T}_D \approx T_D$ 의 관계가 성립하며 전동기의 속도변화는는 무조건 0으로 고정된다. 이를 이용하면 속도가 0으로 고정된 기간동안 \widehat{T}_D 를 연산하고 그렇지 않은 경우의 \widehat{T}_D 를 비교하여 α 를 연산할 수 있다. 연산과정에서 n번째에서 정상적인 제어가 이루어 졌으며 (n+1)번째에서 제어기 출력을 0으로 고정시켜서 실제 외란을 정확히 안다고 가정하면 식(6)을 변형시켜 예 의해 α 를 다음의 수식과 같이 연산할 수 있다.

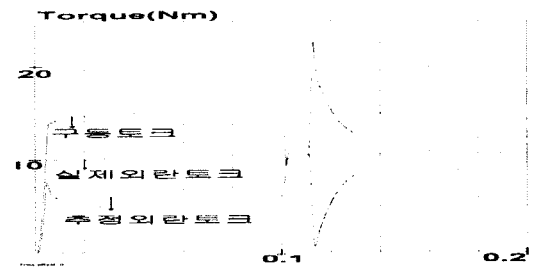
$$\alpha = \frac{T_{e(n)} - \widehat{T}_{D(n)}}{T_{e(n)} - T_{D(n)}} \quad (7)$$

이때, 매우 짧은 시간 동안 T_D 의 변동이 거의 없다는 고전적인 가정을 도입하여 $T_{D(n)} = \widehat{T}_{D(n+1)}$ 을 사용한다. 그림.5에 관성을 다르게 알고 있는 경우에 대하여 제시된 알고리즘을 적용한 예를 도시하였다. 만약 그림.5b 같이 관성을 2배로 잘못 알고 있는 경우와 그림.5c 같이 관성을 약 절반으로 알고 있는 경우와 에 대해서 계산을 해 본 결과 실제 관성을 추정 오차가 거의 없는 정확한 관성을 추정할 수 있다.

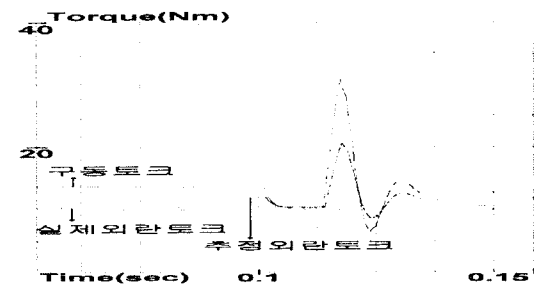
제시된 방법은 속도가 변하는 도중에 잠시 속도제어기를 정지시키고 전향 보상만으로 제어기를 구동하여 속도의 변동을 0으로 억제하는 방법을 사용하므로 임의의 상황에서 항상 사용할 수 있는 형태가 아니다. 그러나, 속도 제어기의 도움없이 속도의 변동이 항상 0으로 수렴하므로 속도 변동을 예측할 수 있기 때문에 매우 안정적이며 공정제어 개시 이전의 초기 상태 혹은 공정상에서 피조물가공을 하지 않는 귀환시간 등에 매우 손쉽게 적용하여 비교적 정확한 관성값을 알아낼 수 있다.



〈그림 5.a〉 $\widehat{J}_m = J_m$ 인 경우의 외란 추정



〈그림 5.b〉 $\widehat{J}_m = 2J_m$ 인 경우의 외란 추정



〈그림 5.c〉 $\widehat{J}_m = 0.5J_m$ 인 경우의 외란 추정

3. 결 론

본 논문에서는 외란 추정에 있어서 연산 효율이 매우 좋고 간단한 외란 추정기를 구성하고 이를 제어에 응용한 결과를 제시하였다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 관성 정보가 정확한 경우 외란 추종 능력이 매우 뛰어나고 이를 제어에 응용하면 비선형적인 마찰력의 영향을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 관성의 변동에 민감한 특성을 제거하기 위하여 간단하면서 매우 안정적으로 동작하는 별도의 관성 추정기를 제시하였다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Robert D.Lorenz, "High-Resolution Velocity Estimation for All-Digital AC Servo Drives", IEEE Trans.IA, vol.27, no.4, Aug.1991
- [2] B.Friedland and Y.J.Park, "On Adaptive Friction Compensation", IEEE Trans on Automatic Control, Vol 37, No.10 pp 1609-1612, 1992
- [3] Q.P.Ha, A.Bonchis, D.C Rye and H.F.Durrent "Variable Structure Systems Approach to Friction Estimation and Compensation", IEEE International Conference On, Vol4, pp24-28, 2000
- [4] S.J.Hong, H.W.Kim, and S.K.Sul, "A novel inertia identification method for speed control of electric machine", IEEE IECON, pp.1234-1239, 1994
- [5] K.B. LEE, J.H. SONG, I. choy, and J.Y.Yoo, "An inertia identification using ROELO for low speed control of electric machine, IEEE APEC, pp.1502-1055, 2003

Appendix A

시뮬레이션에서 사용한 기계적 파라미터

관 성	0.012[Kg- m ²]
점 성 마찰력	0.016[Nm/rad/s]
쿨롱 마찰력	10[Nm]