

상전도 방식의 자기부상 제어기 설계(II)

장석명^{*}, 성소영^{*}, 정상섭^{**}, 조홍제^{**}, 성호경^{**}
충남대학교 전기공학과, 한국기계원구원 자기부상열차 개발 그룹^{**}

State Feedback Controller Design For Electro-magnetic Suspension System

Seok-Myeong JANG^{*}, So-Young SUNG^{*}, Sang-Sup Jung^{*}, Hng-Jea JO^{**}, Ho-Kyung SUNG^{**}
Chung-Nam National University Dept. of Electric Eng., KIMM MagLev Project Team^{**}

Abstract - This paper presents the design of state feedback controller with state observer(dynamic filter) for Electro-Magnetic Suspension System. Also, the gain scheduling technique using state observer is analyzed in the time domain and frequency domain.

1. 서 론

지난 99' 춘계 전기 기기 연구회에서 발표한 "상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계"[1]에서는 선형모델을 기준으로 시스템의 각 상태변수를 직접 계측 가능하다는 조건에서 이론적으로 시뮬레이션을 하였다. 본 논문에서는 지난 논문에서 다루지 않은 자속 피드백과, 실제의 시스템에서 각 상태변수를 직접 계측 할 수가 없으므로 가속도 센서와 공극 센서로부터 신호를 입력 받아 상태변수를 관측하는 동특성 필터를 설계한다. 또한 각 제어개인의 역할과 동특성 필터로부터 만들어진 제어변수의 특성을 분석하고, 외란에 대한 각 제어개인의 역할에 대해서 고찰해보고자 한다.

2. 제어기 설계

실제의 시스템은 공극센서와 가속도 센서로부터 시스템의 제어변수를 만들어 내는 동특성 필터를 가지고 있다. 이러한 전체 시스템의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타냈다.

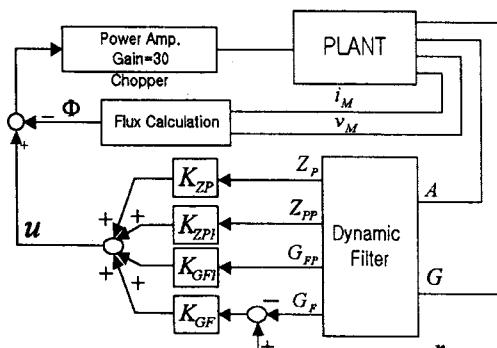


그림 1 전체 시스템의 블록도

그림 1에서 A 는 가속도 센서로부터의 출력이고, G 는 공극 센서로부터의 출력, Z_P 는 절대속도, Z_{PP} 는 절대가속도, G_F 는 상대위치, G_{PP} 는 상대속도이고, θ 는 전자석의 자속이다. 그리고 플랜트의 상태방정식은 식 (1)과 같다. 식(1)에서 x_1 , x_2 , x_3 는 위치, 속도, 가속도이다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 100.8 & 0 & -0.0917 \\ 0 & 1100 & 40 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 40 \end{bmatrix} v(t) \quad (1)$$

이 동특성 필터의 각 신호와 제어변수들간의 전달함수는 식 (2)~식 (5)과 같고, 이들간의 주파수 응답특성을 그림 2에 나타냈다.

$$\frac{G_F}{G} = \frac{1}{5.2 \times 10^{-5} s^2 + 0.003s + 1} \quad (2)$$

$$\frac{G_{FP}}{G} = \frac{0.0030s}{100s^2 + 0.0052s + 0.3} \quad (3)$$

$$\frac{Z_{PP}}{A} = \frac{0.0113s^2}{0.0113s^2 + 0.1465s + 1.0000} \quad (4)$$

$$\frac{Z_P}{A} = \frac{0.1127s}{0.0010s^2 + 0.1465s + 1.0000} \quad (5)$$

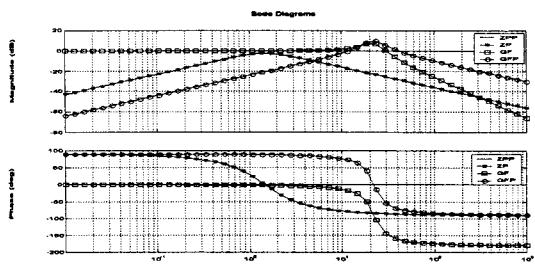


그림 2 동특성 필터의 입력신호와 출력 제어변수의 주파수 응답 특성

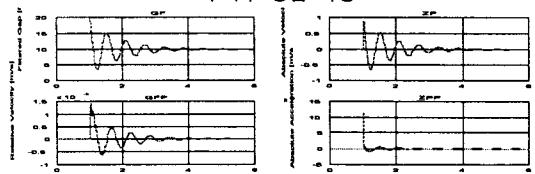


그림 3 동특성필터로부터 만들어진 각 시스템 제어변수

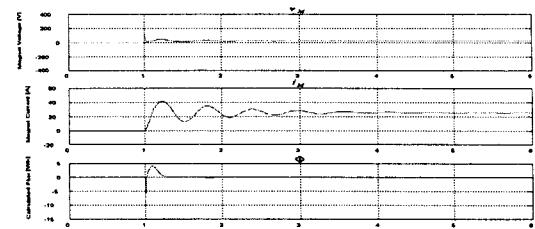


그림 4 전자석의 입력전압, 전류와 계산된 자속

또한 마그네트의 전압과 전류를 측정하여 자속을 계산할 수 있다.

$$\phi = \int_0^t (v_M - R \cdot i_M) dt \quad (6)$$

여기서 R 은 전자석의 저항, v_M 은 전자석의 양단에 걸리는 전압, i_M 은 전자석에 흐르는 전류이다. 이 식을 이용하여 전자석의 자속을 계산한 결과를 피드백 하여 플랜트 입력 u 와 비교하여 제어를 하였다. 따라서 제어 법칙은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = K_{GF}(r - G_F) + K_{GFP}G_{FP} \\ + K_{ZP}Z_P + K_{ZPP}Z_{PP} \quad (7)$$

여기서 K_{GF} 는 상대 위치 게인, K_{GFP} 는 상대 속도 게인, K_{ZP} 는 절대 속도 게인, K_{ZPP} 는 절대 위치 게인, r 은 기준입력, u 는 제어전압이다.

그림 3은 제안된 제어기의 각 제어변수를 보여준다.

3. 시뮬레이션

3.1 각 제어 게인의 변화에 대한 응답특성

본 절에서는 동특성 필터에서 만들어진 각 제어게인들이 시스템에 어떠한 영향을 주는지에 대해서 알아보자고 한다.

그림 5, 6은 K_{GF} 게인에 대한 시스템의 응답특성이다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 K_{GF} 게인의 증가는 시스템의 응답속도를 빠르게 하고, 정상상태 오차를 줄여준다. 그러나 오버슈트를 감소시키는 데는 크게 기여를 하지 못하고, 또한 주파수영역에서 볼 때 이 게인의 증가는 게인여유와 위상여유를 크게 하므로 이 게인을 무리하게 증가시킬 경우 시스템을 불안정하게 한다.

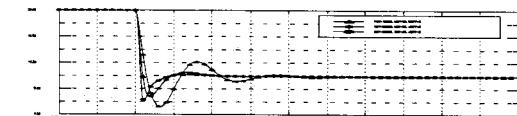


그림 5 K_{GF} 게인의 변화에 따른 시간 응답특성

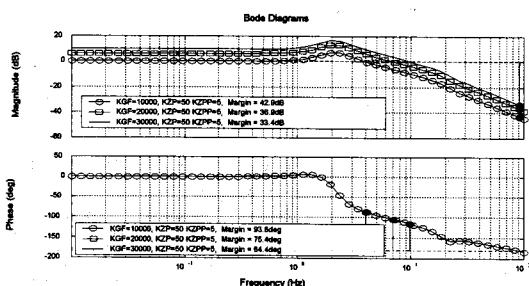


그림 6 K_{GF} 게인의 변화에 의한 주파수 응답특성

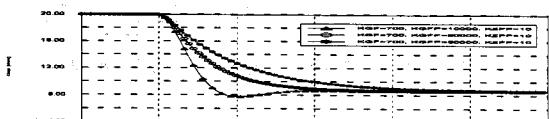


그림 7 K_{GFP} 게인의 변화에 대한 시간 응답특성

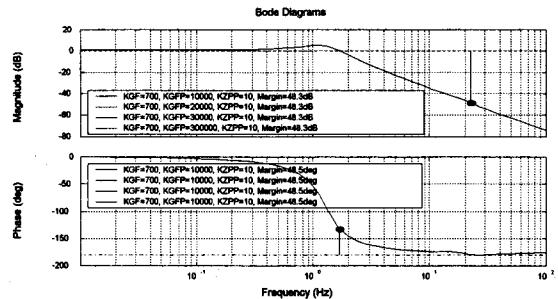


그림 8 K_{GFP} 게인의 변화에 대한 주파수 응답특성

그림 7, 8은 K_{GFP} 게인에 따른 응답특성이다. K_{GFP} 게인은 시스템의 안정도에 많은 영향을 주는 속도 게인으로 증가시켜도 시스템의 안정도를 유지시켜 주고, 시스템을 강인하게 해 준다. 그리고 K_{GFP} 게인을 사용하여 시스템의 게인여유와 위상여유를 크게 하기 위해서는 K_{GF} 게인을 작게 해야 한다. 또한, 이 게인은 시스템의 동특성을 느리게 하는 쪽으로 작용하고, G_{FP} 는 G_F 를 미분한 시스템 제어변수이기 때문에, K_{GFP} 게인의 증가는 공극센서에서 들어오는 외란성분을 같이 증가시키기 때문에 시스템의 외란에 대한 응답특성에는 악영향을 준다. 따라서 외란이 많은 경우에는 K_{GFP} 게인을 낮게 가져가야 한다.

그림 9, 10은 K_{ZP} 게인의 변화에 대한 응답특성이다. Z_P 는 가속도 센서의 신호를 1차 적분한 시스템 제어변수로 속도의 차원이다. 따라서 K_{ZP} 게인의 증가는 위상 여유를 크게 하여 시스템의 안정도를 개선해 준다.

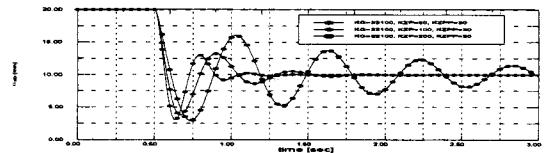


그림 9 K_{ZP} 게인의 변화에 따른 시간 응답특성

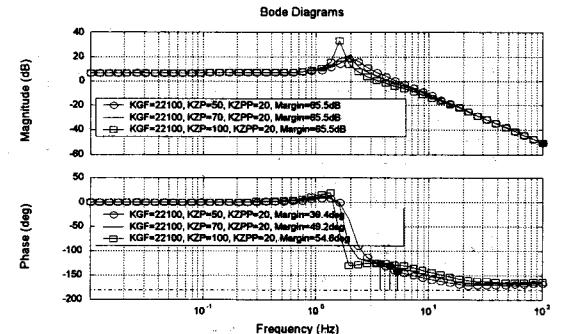


그림 10 K_{ZP} 게인의 변화에 따른 주파수 응답특성

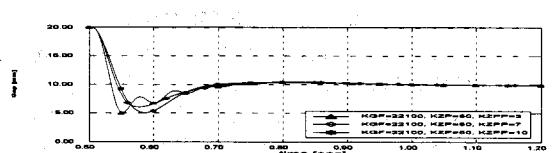


그림 11 K_{ZPP} 게인의 변화에 따른 시간 응답특성

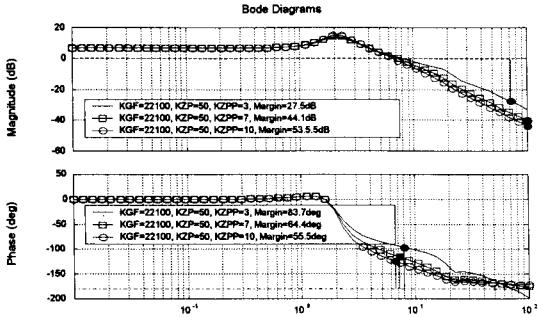


그림 12 K_{ZPP} 계인의 변화에 따른 응답 특성

그림 11, 12는 K_{ZPP} 계인에 대한 응답특성이다. Z_{PP} 는 가속도 센서에서 들어오는 신호로 가속도의 차원을 갖는다. K_{ZPP} 계인을 증가시키면 시스템의 감쇠비를 증가시켜 시스템을 강인하게 해준다. 또한 K_{ZPP} 값이 너무 작으면 시스템의 동특성이 불안정하게 되므로, 적정한 값을 가져야만 한다.

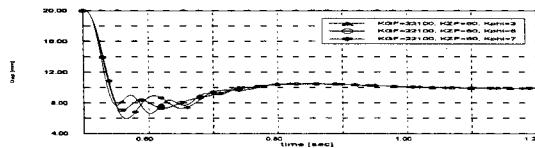


그림 13 K_ϕ 계인의 변화에 따른 시간 응답특성

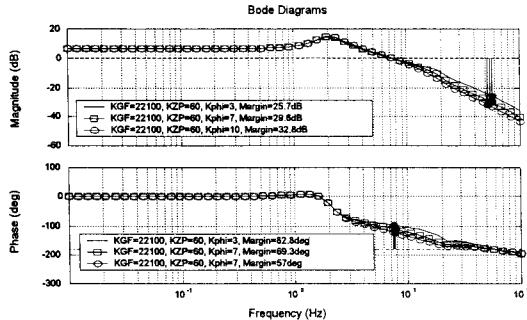


그림 14 K_ϕ 계인의 변화에 따른 응답특성

그림 13, 14는 K_ϕ 계인의 변화에 따른 응답특성이다. 그림 13에서 알 수 있는 바와 같이 K_ϕ 계인의 특성은 K_{ZPP} 의 특성과 매우 유사함을 볼 수 있다.

3.2 제어 변수의 쌍대성

실제의 시스템에서는 시스템의 상태를 계측하기 위해서 가속도 센서와 공극센서를 같이 사용하고 있는데, 여기서 제안된 제어기는 가속도 센서의 신호를 이용하여 Z_P , Z_{PP} 를, 공극센서를 이용하여 G_F , G_{FP} 의 시스템 제어변수를 만들었다. 여기서 G_F 는 위치의 차원이고, Z_P , G_{FP} 는 속도의 차원, Z_{PP} 는 가속도의 차원이다. 본 절에서는 시스템 제어변수 Z_{PP} , ϕ 의 유사성과 Z_P 와 G_{FP} 의 유사성에 대해서 고찰하고자 한다.

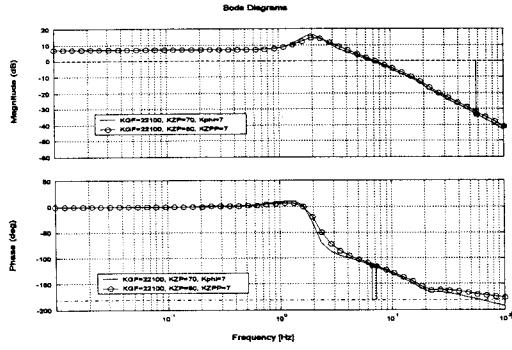


그림 15

Z_{PP} 및 ϕ 피드백에 의한 주파수 응답특성

그림 11, 13에서 가속도 피드백과 자속 피드백은 시간 영역에서 그 특성이 매우 유사함을 알 수 있다.

그림 15는 이들 제어변수의 피드백에 의한 주파수 응답 특성이다. 그림 15에서 알 수 있는 바와 같이 두개의 제어변수의 응답이 매우 유사함을 알 수 있다. 여기서 K_{ZPP} 계인에 의한 계인여유는 126Hz에서 44.1dB, 위상여유는 7.2Hz에서 64.4도이고, K_ϕ 에 의한 계인여유는 56.3Hz에서 33dB, 위상여유는 6.4Hz에서 64.6도이다.

그림 16은 속도의 차원을 갖는 Z_P 와 G_{FP} 의 주파수 응답 특성이다. 속도계인은 이 자기부상 시스템에서 시스템의 응답특성과 안정도에 가장 영향을 많이 주는 계인으로 주로 감쇄비와 관련이 있다. 여기서 제안된 제어기에서 Z_P 는 그 효과가 매우 크게 나타나나, G_{FP} 는 감쇄의 효과가 크게 나타나지는 않았다. 그러나 속도 차원을 갖는 시스템의 제어변수로서 그 자체로 시스템의 감쇄비를 증가시키는 역할을 하고 있기 때문에, 두 제어변수가 유사하게 동작하고 있다.

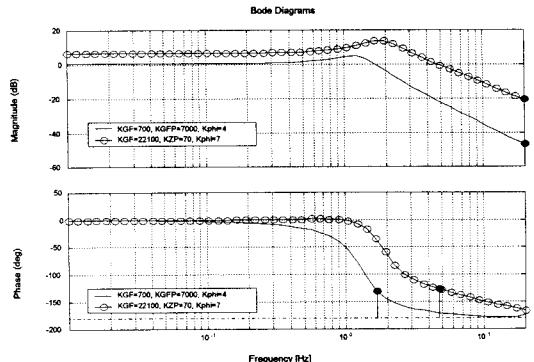


그림 16 K_{GF} 와 K_{ZP} 계인에 대한 주파수 응답특성

그림 11에서 K_{GF} 에 의한 계인여유는 21.9Hz에서 38dB, 위상여유는 1.69Hz에서 49.2도이고, K_{ZP} 에 의한 계인여유는 21.3Hz에서 19.7dB, 위상여유는 4.77Hz에서 53.1도이다.

4. 결론

지금까지 자기부상 플랜트의 선형모델을 기준으로 동특성 필터를 설계하여 실제의 시스템과 유사한 형태로 동특성 필터를 설계하여 시뮬레이션을 했다. 이 결과로부터 다음과 같은 결론에 도달할 수 있다.

- (1) 제어계인 K_{GF} 는 위치계인으로써 어느정도 적정한 값을 가져야하고, 이 계인의 무리한 증가는 시스템의 계

인여유와 위상여유를 작게 하여 시스템을 불안정하게 한다.

(2) K_{GFP} , K_{ZP} 는 속도계인으로써 시스템의 안정도에 가장 많은 영향을 준다.[1] 또한 K_{GFP} 와 K_{ZP} 는 서로 상대적인 계인으로써 같은 역할을 한다.

(3) K_{ZPP} 계인은 가속도 계인으로써 시스템의 감쇄비를 증가시켜 시스템을 안정화시키는데 기여한다. 또한 K_{ZPP} 와 K_g 는 서로 상대적인 계인으로 같은 역할을 한다.

따라서 자기부상 제어기는 이 다섯 개의 제어계인 모두를 사용하여 시스템을 안정화시킬 수도 있지만, 위치, 속도, 가속도의 역할을 하는 계인 세 개만을 선정하여 제어를 하여도 안정하게 시스템을 제어할 수 있다.

(참 고 문 현)

[1] 성소영, 장석명, 김인근, 성호경, “상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계”, 대한전기학회 전기기기연구회 전기철도 연구회 '99춘계 학술대회, p20-p23, 1999. 5. 7

[2] Shinha, "Suspension Dynamics", Peter Peregrinus