

## 속응성을 고려한 자기부상열차용 DC-DC 전원장치

정춘병\*, 전기영\*, 조정민\*, 김대균\*, 이승환\*\*, 오봉환\*\*\*, 이훈구§, 김용주§§, 한경희\*,  
\*명지대학교, \*\*대덕대학, \*\*\*명지전문대, §용인송담대학, §§동양공업전문대학

### DC-DC Power Supply for Maglev Consideration with Quick Response Character

Choon-Byeong Chung\*, Kee-Young Jeon\*, Jeong-Min Jho\*, Cho\*, Dae-Gyun Kim\*,  
Seung-Hwan Lee\*\*, Bong-Hwan Oh\*\*\*, HoonGoo Lee§, Yong-Joo Kim§§, Kyung-Hee Han\*  
\*Myongji Univ. \*\*Daedok College, \*\*\*Myongji College,  
§Yong-in Songdam College, §§Dongyang Tech College

#### ABSTRACT

The author present a modified multi-loop algorithm including feedforward for controlling a 55kW step down chopper in the power supply of Maglev. The gains of the control algorithm were selected based on pole locations formulated from a prototype Bessel transfer function model. The design incorporate tradeoffs in DC-to-DC converter hard-ware para-meters and pole locations. This perturbation is derived by subtracting the desired output voltage from the actual output voltage. The proportional and integral action stabilizes the system and minimizes output voltage error. In order to verify the validity of the proposed multi-loop controller, simulation study was tried using Matlab simulink.

#### 1. 서 론

자기부상열차용 DC-DC 컨버터는 수십개의 부상용 초퍼부하들이 병렬로 구성되어져 있다. 상전도 흡인식 자기부상에 있어서 초기부상은 15mm~20mm 정도에 있다가 정상상태에서는 10mm 정도로 사상을 유지하기 때문에 초기 부상에서 정상상태에 이르는 짧은 시간동안의 전류변화가 매우 크다<sup>[1]</sup>. 기동시 전류가 급변하는 부하 시스템과 알 수 없는 제어루프속도를 갖는 정전력 부하들은 DC-DC 컨버터의 제어 안정성에 큰 영향을 줄 수도 있다<sup>[2][3]</sup>.

본 논문에서는 다른 크기의 부하 및 다른 종류의 부하에 대하여 DC-DC 컨버터 시스템의 제어 안정 및 원하는 특성을 기대할 수 있는 다중제어루프를 적용하고, 제어기가 포함된 전체시스템의 상태방정식의 특성방정식을 구하여 원하는 극점에 극을 위치시킬 수 있도록 계수를 선택하여 안정된 제어가 되도록 하였다. 제안한 알고리즘의 우수성과 강인함을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인 하였다.

#### 2. 시스템 구성 및 다중루프제어기 설계

##### 2.1 부상 시스템의 구성

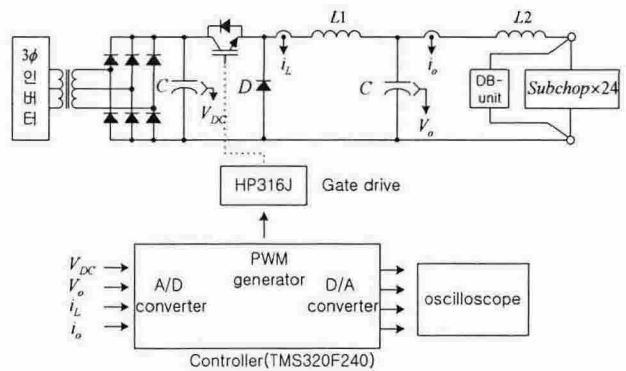


그림 1 전체 시스템의 구성

시스템의 전력회로는 그림 1에 나타낸 것과 같이 컨버터 및 강압초퍼를 중심으로 하여 입력전압에 대한 직류 평활용 필터와 출력전압 및 전류에 대한 필터회로로 구성되어 있다. 위 그림과 같이 실제의 초퍼 회로에 추가된  $L_2$ 는 부하인 Sub-chopper가 초기 충전시와 초기 부상시에 과전류로 인해서 Under voltage fault의 발생을 방지하기 위한 것이다.

##### 2.2 다중루프제어기의 설계

그림 2는 제안된 자기부상열차의 제어블럭도를 나타내고 있다.

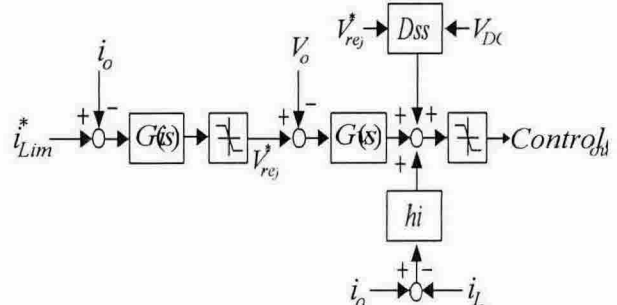


그림 2 강압초퍼의 제어블럭도

제어부는 일정 전압을 제어할 수 있는 전압제어루프를 inner루프로 하였고, 과 전류시 출력 전류를 제한할 수 있는 전류제어기를 outer 루프로 구성하였다. 따라서, DC 링크 전압을 보다 안정화시킬 수 있었다.

### 2.2.1 전압제어기

자기부상열차의 DC-DC 컨버터는 부상용 초퍼의 원활한 동작을 위해 과도한 부하 외란 조건에서도 DC 링크를 빠른시간내에 안정하게 유지하여야 한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서 극배치 제어가 바람직하다. 그러나 PI제어기만으로는 DC-DC 컨버터의 극점을 원하는 위치로 배치시킬 수 없다. 따라서, 제어기는 식(1)과 같이 구성하였다.

$$d(t) = D_{ss}(t) - h_i [i_L(t) - i_o(t)] - h_v [V_o(t) - V_{ref}(t)] - h_n \int [V_o(t) - V_{ref}(t)] \quad (1)$$

제어기의 출력은 세 개의 제어항의 합으로 구성되어 있다. 첫 번째 항은, 비교적 완만하게 변하는 전류  $i_L$ 과 출력 전류  $i_o$ 의 차로 이루어져 있다. 극배치가 스위칭 주파수에 비해 적어도 1/10배 이하에 배치되었다면, 스위칭 주기에 발생하는 인덕터의 전류리플은 제어루프에 영향을 주지 않게 된다. 이와 같이 극점이 설정이 되면, 첫 번째 항은  $h_i$ 를 조절하여 출력전류에 발생하는 외란을 감쇠시킬 수 있다. 왜냐하면 듀티비의 변화는 지령전압  $v_{ref}$ 에 대하여 출력 전압  $v_o(t)$ 의 차에 의해서만 발생하기 때문이다. 따라서, 첫 번째 제어 항에 의해 빠른 부하응답을 기대할 수 있다.

두 번째와 세 번째 항은, 출력전압에 맥동을 고려한 비례적분제어기로 이루어져 있다. 비례적분 제어기의 출력은 원하는 전압을 실제출력전압과의 차에 의해 발생된다. 이때, 비례항은 시스템을 안정화시키며, 적분항은 출력 전압의 오차를 최소화하는 역할을 한다.

### 2.2.2 극배치

식 (2)는 식 (1)의 제어기를 포함하는 DC-DC 컨버터의 상태공간평균화모델형태로 표현하였다. 이때 제어기를 제외하고 시스템의 파라미터를 적용한 open-loop 시스템 극점 또는 eigenvalues는  $s_1, s_2 = -4.8 \pm j510$ 이다.

페루프 극점은 DC-DC컨버터의 지령전압  $v_{ref}$ 를 상수로 가정하였을 때, 식(2)의 상태 공간평균환 시스템 행렬식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & \frac{V_{DC}}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_n \end{bmatrix} v_{ref} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{31} &= -\frac{h_v}{C} + \frac{h_i}{RC} \\ A_{32} &= \frac{h_i}{L} + \frac{h_v}{RC} - \frac{h_i}{R^2C} - h_n \\ A_{33} &= -\frac{h_i V_{DC}}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

이를 위해서, 이득 값들은 적합한 극점 설정을 통하여 식(4)로 부터 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} h_i &= \frac{L}{V_{DC}} \left( k_2 - \frac{1}{RC} \right) \\ h_v &= \frac{LC}{V_{DC}} \left( k_1 - \frac{1}{LC} \right) \\ h_n &= \frac{k_0 LC}{V_{DC}} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서,  $V_{DC}$ 은 입력전압,  $k_0, k_1, k_2$ 는 원하는 극점을 선택하고 특성방정식을 구하여 계수를 결정한다.

### 2.2.3 전류제어기

자기부상 열차는 부상 및 어떤 이상조건에 의해 빈번하게 Fault 가 발생하게 된다. 따라서, 본 시스템은 전류에 의해 발생 가능한 Fault 신호를 최소화하기 위하여, 전류제어기를 구성하였다. 이렇게 구성된 전류제어기는 정상적인 조건에서 Wind-up 제어기를 구성하였다. 그림 3은 Anti-Windup 제어기가 있는 블록도이며 전달함수는 식(5)과 같고 식(5)를 Backward Transform으로 변환하면 식(6)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} Err(s) &= V'(s) - V^*_{ref}(s) \\ V'(s) &= K_p e(s) + u_i(s) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_i(s) &= \left( \frac{K_i}{s} \right) \{ e(s) - K_a Err(s) \} \\ u_i(n) &= u_i(n-1) + T_s K_i \{ e(n) - K_a Err(n) \} \\ V'(n) &= K_p e(n) + u_i(n) \end{aligned} \quad (6)$$

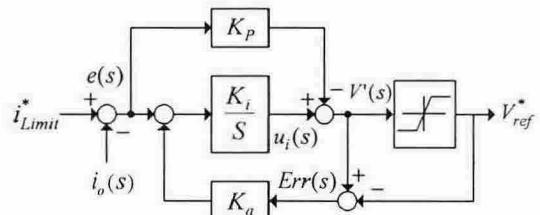


그림 3 Anti-windup 전류제어기

## 3. 시뮬레이션 및 실험결과

### 3.1 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 다중루프제어기를 이용한 알고리즘이 자기 부상열차 추진장치의 전원장치에 적용하였다. 그림 4, 5는 부상용초퍼의 변화와 L의 변화시 극배치제어에 의한 극점의 변화를 나타낸다. 부상용초퍼의 변화에 큰 변화가 있고, L의 변화에는 크게 반응하지 않음을 알 수 있다.

그림 6, 7은 정격 부하의 10[%](16.36Ω) - 100[%](1.636Ω) - 10[%] (16.36Ω)로 부하를 투입하였고, 이때 전류제어기의 전류 제한치는 100[A]로 하였다. 그림과 같이 출력 전압의 과도특성 및 정상상태의 특성이 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다.

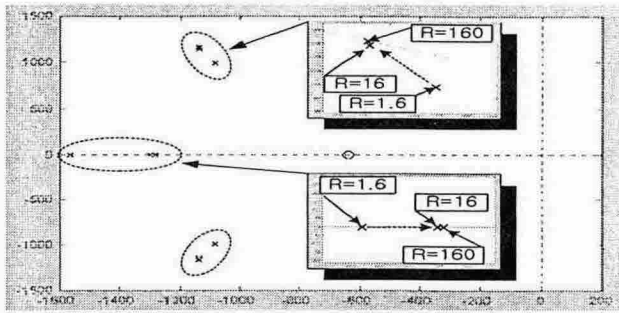


그림 5 R부하변화시 극점이동

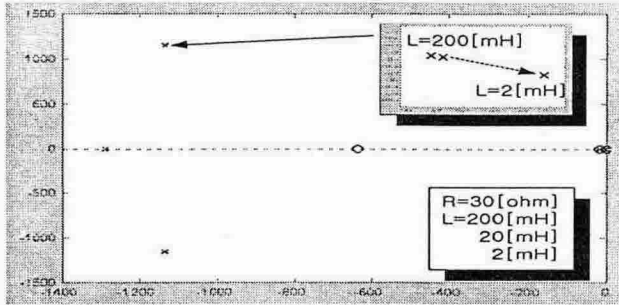


그림 6 RL부하변화시 극점이동

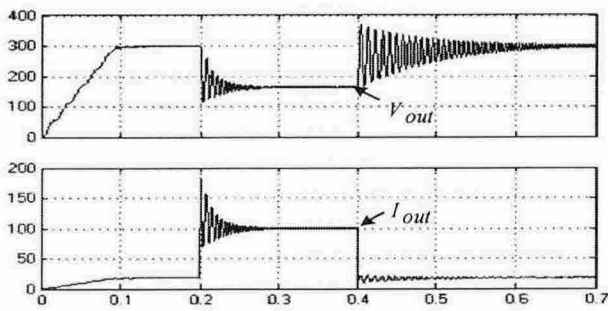


그림 7 PI 제어기만 적용한 경우

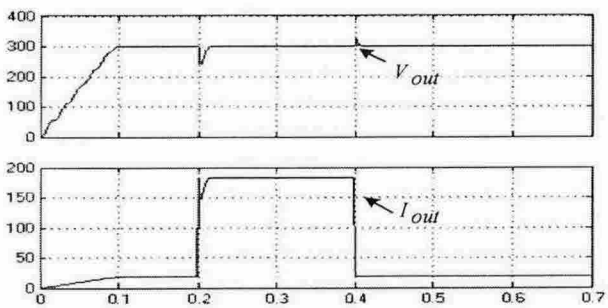


그림 7 다중루프제어기를 사용했을 때의 출력전압과 출력전류

### 3.2 실험결과

본 논문에서 제안한 다중루프에 의한 DC-DC 전 원장치의 특성을 확인하기 위한 실험결과 파형이다. 실험은 시뮬레이션과 같은 저항부하를 사용할 수 없어 근사치의 값을 사용하였으며 스위칭소자로는 1700[V]/600[A]의 IGBT를 사용하였다. IGBT를 구동하기 위한 스위칭 주파수는 2.5[KHz] 하였다.

그림 8의 PI제어기만을 적용한 경우와 그림 9의 극배치 제어기법을 적용한 다중루프제어기를 적용한 경우에서와 같이 출력 전압 및 전류 파형의 리플이 개선됨을 확인할

수 있었다.

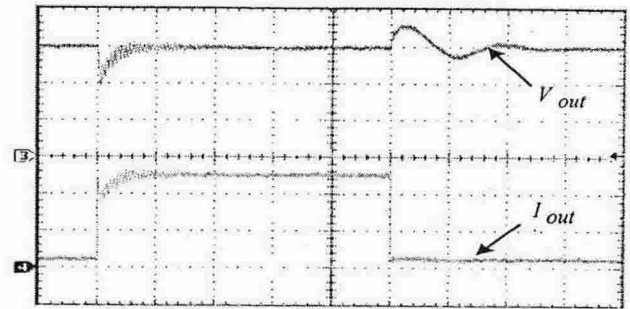


그림 8 PI 제어기만 적용한 경우

(CH3: 100[V/Div], CH4: 50[A/Div] TD: 200[msec])

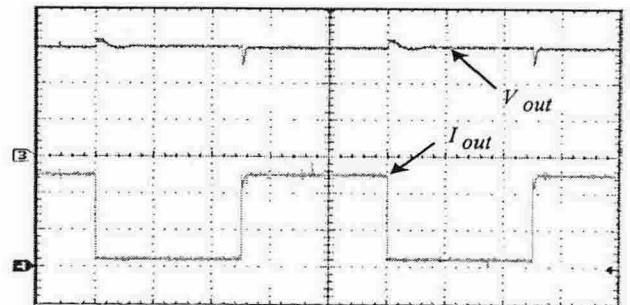


그림 9 다중루프제어기 적용시(전류제한 200[A])

(CH3: 100[V/Div], CH4: 50[A/Div] TD: 200[msec])

## 4. 결 론

본 논문은 자기부상용 Sub-Chopper에 안정한 전원을 공급하기 위해 다중루프제어 알고리즘과 극배치제어기법을 제안하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제시한 다중루프제어기는 부상시 급격한 전류 외란으로 인해 DC-DC컨버터 출력전압 sag 및 과전압현상에 대하여 제어특성을 향상시켰다.
- (2) 시스템의 제어특성을 확인하기 위해 다양한 크기의 저항부하 및 저항과 인덕턴스 부하를 DC-DC 컨버터의 부하로 사용하여 각각의 부하에 대한 극점을 표시하고, 이렇게 표시된 극점의 이동을 분석하여 시스템이 안정되도록 하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] A.K. Wallace, J.H.Parker and G.E. Dawson, "Slip Control for LIM Propelled Transit Vehicles", IEEE Trans. Magnetics, Vol-16, No.5, 1980
- [2] B. Choi, B. Cho, F. Lee and R. Ridley, "Three-Loop Control for Multimodule Converter Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 8, No.4, pp. 466-474, Oct 1993.
- [3] F. Garofalo, P. Marino, S. Scala and F. Vasca, "Control of DC-DC Converters with Linear Optimal Feedback and Nonlinear Feedforward", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 6, pp. 667-615, Nov 1991.