

다중 제어루프에 의한 DC-DC 전원장치에 관한 연구

조주현\*, 정정훈\*조정민\*, 김길동\*\*, 이승환\*\*\*, 이훈구\*\*\*\*, 김용주\*\*\*\*, 한경희\*  
 \*명지대학교, \*\*철도기술연구원, \*\*\*대덕대학, \*\*\*\*충인승담대학, \*\*\*\*\*동양공업전문대학.

A Study on DC-DC Power Supply with a Multi-loop Controller

J.H. Jho\*, J.H. Chung\*, J.M. Jho\*, K.D. Kim\*\*, S.H. Lee\*\*\*, H.G. Lee\*\*\*\*, Y.J. Kim\*\*\*\*, K.H. Han\*  
 \*Myongji Univ., \*\*Taedok College, \*\*\*Myongji College, \*\*\*\*Yong-in Songdam College, \*\*\*\*\*Dongyang Tech College.

**Abstract** - The author present a modified multiloop algorithm including feedforward for controlling a 45kW step down chopper in the power supply of Maglev. The control law for the duty cycle consists of three terms. The first is the feedforward term which compensates for variations in the input voltage. The second term consists of the difference between the slowly moving inductor current and output current. The third term consists of proportional and integral terms involving the perturbation in the output voltage. 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. To verify the validity of the proposed multiloop controller, simulation study was tried using Matlab/simulink.

1. 서 론

자기부상열차(Magnetically Levitated Vehicle)는 전자기적인 힘으로 부상, 추진되므로 바퀴가 없이 운전되는 새로운 궤도교통수단의 차량이다. 따라서 선로와 선체간에 아무런 접촉 부분이 없어 기계적 진동이 없이 조용히 주행할 뿐만 아니라, 동력 발생 시스템은 별도의 회전-직선형 운동변환장치가 필요 없어 시스템은 가동 신뢰성이 높고 유지 보수비가 적은 것이 큰 특징이다.

그러나, 이러한 장점에도 불구하고 아직 실용화하기에 기술적인 미흡한 점이 있어 실용화하지 못하고 있다. 이러한 어려움 중에 하나는 차량을 추진하는데 필요한 안정된 전원을 공급해주는 전원장치에 있다. 자기 부상열차 추진장치의 전원장치는 강압 초퍼 형태로 구성되어 있다. 이러한 주 전원장치에 연결된 부하는 부상 제어용 초퍼 24개이다. 부상 제어용 초퍼는 초기 부상시 및 급가감속시 전류의 흐름이 매우 급격하게 변하게 됨으로써, 주 전원 공급 장치의 DC 공급전압이 불안정하게 된다. 따라서, 주 전원장치는 매우 빈번하게 fault신호를 내게 된다.

본 연구에서는 위와 같은 난점을 개선할 수 있도록 수정된 다중루프 제어를 제시하였다. 제시된 제어기는 3개의 항으로 구성되어 있다. 첫 번째 항은 입력전압의 변동에 대하여 보상할 수 있는 피드포워드항이며 두 번째 항은 인덕터 전류와 출력 전류 사이의 차를 보정한 항이며, 마지막으로 세 번째 항은 실제 출력된 전압에서 나타나는 리플 현상을 제어하기 위해 사용된 비례 적분항이다. 따라서 비례-적분제어기(PI Controller)는 시스템을 안정화시키며 출력전압의 오차를 최소화한다.

이러한 시스템의 각부 특성을 확인하기 위해서 Matlab Simulink를 이용하였다. 시뮬레이션 결과로부터 본 연구에서 제시하는 제어기는 부하가 급변하는 시스템에 있어서도 안정된 전원을 확보할 수 있음을 보여주고 있다.

2. 전체 시스템의 구성

2.1 강압 초퍼의 설계

강압 초퍼의 전력 변환부는 그림1과 같다. 강압용 초퍼의 리액턴스는 2가지 설계제한을 받는다. 그 첫 번째는 강압 초퍼의 동작을 정격의 10% 이상의 부하에 대하여 연속모드로 동작하여야 한다. 두 번째 제한조건은 사용할 수 있는 인덕터 코어이다. 정격 부하의 10%에 해당하는  $R=20[\Omega]$ ,  $f_s=2.5[\text{kHz}]$  그리고, 시비율  $D=0.5$ 인 조건에서 임계치 인덕턴스에 다음과 같은 방정식을 적용하면, 임계인덕턴스  $2[\text{mH}]$ 가 된다.

$$L = \frac{R}{2f_s} (1 - D) \tag{1}$$

실제로 적용한 인덕턴스값은 표1과 같이 2.2[mH]로 정하였기때문에 정격의 9.1% 이하의 부하에서 불연속 모드로 동작하게 된다.

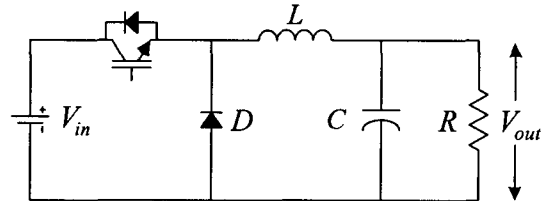


그림 1. 강압 초퍼의 전력 변환부

그 다음으로, 캐패시터의 값은 출력 전압의 리플율(peak-to-peak)가 1% 이하이거나 또는  $\Delta V_o < 3V$  이하로 산정하였다. 이러한 결과를 얻기 위하여 식(2)와 같은 방정식을 적용하였다.

$$C = \frac{D}{8L f_s^2 \Delta V_o} (V_{in} - V_o) \tag{2}$$

따라서, 캐패시터의 값은 2500[uF]값 이상이 되어야 한다. 그 이유는 캐패시터가 게인 선택과 시스템의 동특성에 있어서, 중요한 역할을 수행하기 때문이다. 만일 C값이 너무 작다면, 캐패시터에 과도시 충분한 에너지를 갖고 있지 못하여 출력 전압을 유지하기가 어렵게 된다. 따라서, 부하회로에 대하여 전류 불연속 현상이 나타나게 된다. 이와 반대로 캐패시터의 값이 너무 크다면 출력 전압에 있어서 작은 변동은 제어기의 출력이 최대치(full-on)와 최소치(full-off)의 시비율 사이에서 진동(bouncing)하게 된다. 이것은 인덕터를 다룰 수 있는 것에 비하여 캐패시터에 너무 많은 에너지가 저장되어 있기 때문이다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 적절한 값으로 선정할 필요가 있다.

## 2.2 제어기 구성

그림2는 제안된 자기부상열차의 제어블럭도를 나타내고 있다. 제어부는 일정 전압을 제어할 수 있는 전압제어루프를 inner루프로 하였고, 과 전류시 출력 전류를 제한할 수 있는 전류 limit 제어를 outer 루프로 구성하였다. 따라서, DC 링크 전압을 보다 안정화시킬 수 있었다.

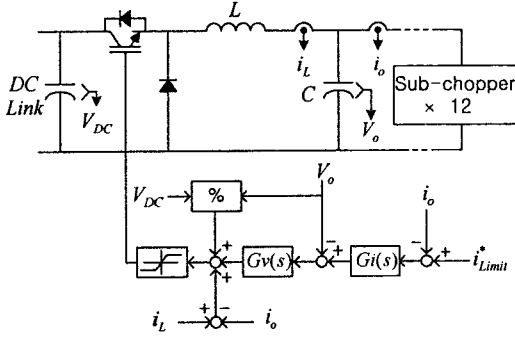


그림 2. 강압효과의 제어블럭도

### 2.2.1 전압 제어기

전압 제어기의 구성은 입력 전압의 변화에 따라 출력 지령값을 보상할 수 있는 피드포워드  $D_{ss}(t)$ 항과, 리액터에 흐르는 전류  $i_L$ 과 부하에 흐르는 전류  $i_o$ 에 전류차에 대한 보상항, 그리고 PI 제어기  $Gv(s)$ 항으로 이루어져 있으며 식(1)과 같이 표현된다. [1]-[3]

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

여기에서,  $D_{ss}(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$D_{ss}(t) = \frac{V_{ref}(t)}{V_{DC}(t)} \quad (2)$$

### 2.2.2 전류 limit 제어기

자기부상 열차는 자기부상 및 속도 급가감시 어떤 이상조건에 의해 빈번하게 fault 가 발생하게 된다. 따라서, 본 시스템은 전류에 의해 발생 가능한 fault 신호를 최소화 하기 위하여, 전류 limit 제어기를 구성하였다. 이렇게 구성된 전류 limit 제어기는 정상적인 조건에서 wind-up 현상이 발생하게 된다. 따라서, Anti-Windup 제어를 적용하여 이러한 현상에 대하여 대처할 수 있도록 하였다.

그림3은 Anti-Windup 제어기가 있는 블록도이며 전달함수는 식(3)과 같고 식(3)를 Backward Transform으로 변환하면 식(4)와 같이 정리된다.

$$Err(s) = V'(s) - V^*_{Limit}(s) \quad (3)$$

$$V'(s) = K_p e(s) + u_i(s)$$

$$u_i(s) = \left( \frac{K_i}{s} \right) (e(s) - K_a Err(s))$$

$$u_i(n) = u_i(n-1) + T_s K_i (e(n) - K_a Err(n))$$

$$V'(n) = K_p e(n) + u_i(n) \quad (4)$$

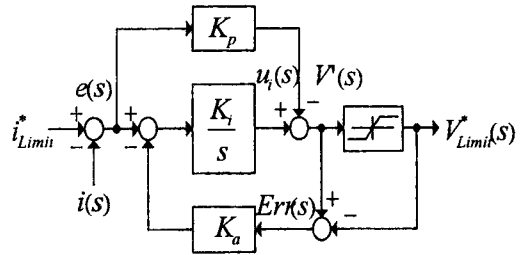


그림 3. Anti-windup 전류 limit제어기

## 2.3 시뮬레이션

전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 본 연구에서는 MATLAB을 이용하여 제어 블록을 구성하였다.

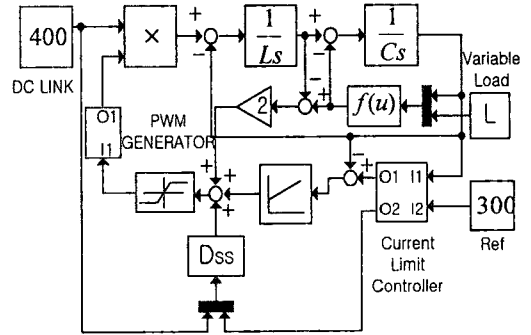


그림 3 시뮬레이션 블록도

표1은 시뮬레이션에 이용된 강압 효과의 파라미터를 나타내고 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

강압 효과의 파라미터			
$V_{in}$	400[V]	$V_o$	300[V]
$f_s$	2.5[kHz]	$L_f$	2.2[mH]
$C_f$	3500[μF]	$R$	2[Ω]

시뮬레이션에 이용된 전체적인 제어구조는 그림2에 나타나 있는 것 같이 구성되어 있다. 그리고, 본 연구에서의 시스템 파라미터는 표1과 같이 입력전압 400[V]일 때 출력 전압은 300[V]로 하였다. 이러한 시스템에 대한 시뮬레이션의 목적은 50[kW]의 강압효과로 이루어진 DC 전원공급장치의 DC링크 전압 제어에 대한 특성을 알아보기 위한 것이다. 이때 시뮬레이터의 스위칭 주파수는 2.5[kHz]로 하였다.

그림5는 일반적인 PI 제어기로 구성된 회로에 있어서 출력 전압 및 전류를 나타내고 있다. 시험 조건은 정격 부하의 10[%]-100[%]-10[%]로 부하를 투입하였고, 이때 전류 limit 제어기의 전류 제한치는 100[A]로 하였다.

그림4와 그림5의 실험결과로부터 전류리플 보상 제어를 적용하였을 경우 전류 리플 보상에 의해 출력 전압 및 전류 파형이 개선됨을 볼 수 있다.

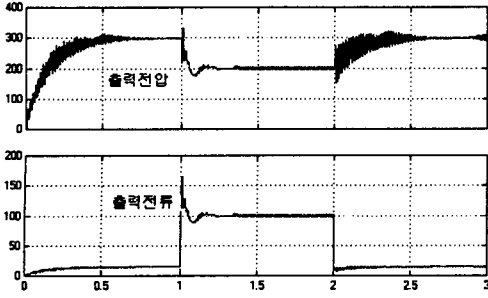


그림 5. 제어기가 없는 경우의 각부 출력 파형

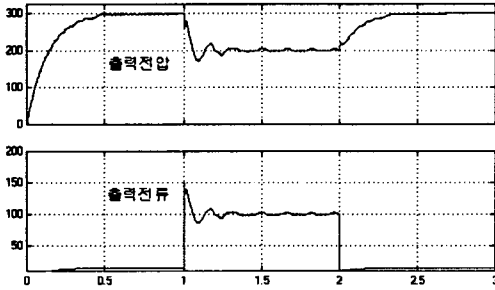


그림 6. 전류리플 보상 제어기를 적용하였을 경우의 각부 출력 파형

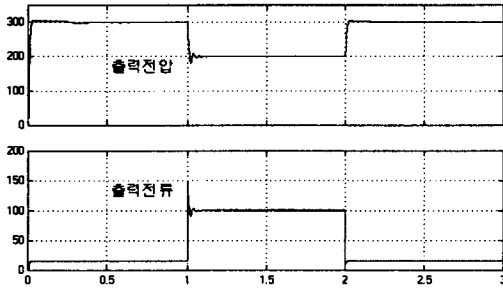


그림 7. 다중루프제어기를 사용했을 때의 과전류 제한시 출력 전압과 전류

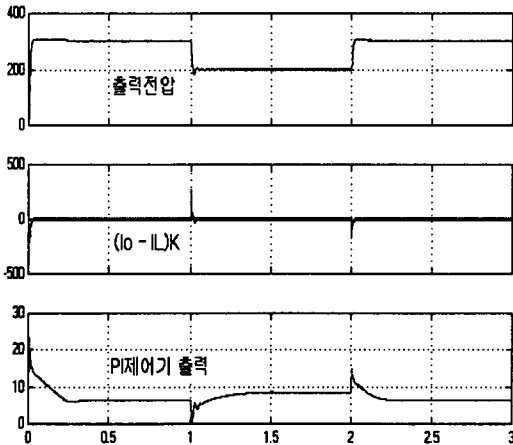


그림 8. 다중루프제어기를 사용했을 때 출력전압 및 제어기의 각부 파형

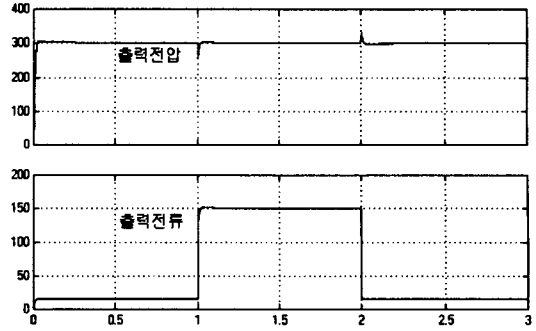


그림 9. 다중루프제어기를 사용했을 때 출력 전압과 전류

그림6은  $D_{ss}(t)$ , 전류 리플 보상기 및 PI 제어기를 통합한 식(1)에 해당하는 제어기를 사용하였을 때 출력 전압파형 및 전류파형을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 출력 전압의 과도특성 및 정상상태의 특성이 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다.

그림7은 식(1)에 해당하는 제어기를 사용하였을 경우 제어기의 제어항 각부의 파형을 나타낸 것이다. 첫 번째 그림은 출력전압이며, 두 번째 파형은 전류 리플 보상기에 의한 보상 전압항, 세 번째 파형은 입력 전압에 대한 출력 전압을 보상할 수 있는  $D_{ss}(t)$  제어항을 나타내고 있다. 출력 파형으로부터 전류 리플 보상기는 부하의 급변시 출력 전압을 보상하며,  $D_{ss}(t)$ 는 과도시 및 부하 급변시 모두 동작하여, DC 링크 전압을 안정화시키게 될 수 있다.

그림8은 본 시스템에 적용할 제어기 형태로써 전류 리미트는 183[A]로 하였을 경우에 부하 급가변시 출력 전압 파형 및 출력 전류 파형을 나타낸 것으로써 비교적 양호한 제어기의 특성을 나타내고 있다. 따라서, 본 시스템에서 요구하는 동특성에 적용하는 특성을 얻을 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구는 자기부상용 초퍼에 안정한 전원을 공급하기 위한 추진장치의 전원장치 제어 알고리즘을 제시하였다. 그 결과 부하가 급변하는 조건에서도 안정된 전원을 확보할 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통하여 알 수 있었다. 따라서, 다중루프제어기에 의해 제어되는 추진장치의 전원장치는 자기부상열차의 전원장치에 적용가능함을 알 수 있었다.

향후, 현재 자기부상열차의 전원장치에 이러한 제어 알고리즘을 적용하여 자기부상열차의 실용화에 보다 가까이 접근할 수 있도록 하는 노력이 필요하다고 생각한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P. Liu and P. Sen, "A Novel Method to Achieve Zero-Voltage Regulation in Buck Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, No. 3, pp.292-301, May 1995.
- [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.