

극배치 제어기법을 이용한 자기부상열차용 전원장치에 관한 연구

정준병*, 이상현*, 김은기*, 조정민**, 전기영***, 강승욱§, 김용주§§, 한경희*

*명지대학교, **한국기계연구원, ***중소기업진흥공단, §카톨릭상지대학, §§동양공업전문대학

A Study on the Power Supply of a magnetic levitation system(MAGLEV) using pole placement technique

C. B. Chung*, S. H. Lee*, E. K. Kim*, J. M. Jo**, K. Y. Jeon***, S. O. Kang§, Y. J. Kim§§, K. H. Han*

*Myounji Univ, **KIMM, ***SBC, §Catholic Sangji Col, §§Dongyang TEC Col

ABSTRACT

When the magnetic levitation system(MAGLEV) initially rise, The MAGLEV has a weak point that is very large variation of the electric current. In this paper, The author applied the multi-loop-control to stably control the magnetic levitation system(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. In order to confirm the superiority of the proposed pole selection and controller, MATLAB simulation and experiment results are presented.

1. 서론

자기부상열차의 부상 전원장치는 강압 쇼퍼의 형태로 구성 되어 있으며, 24개의 부상 제어용 쇼퍼가 주 전원장치에 연결 된다. 부상 제어용 쇼퍼는 초기 부상시 전류의 흐름이 매우 급격하게 변하게 됨으로써, 주 전원 공급 장치의 DC 공급전압이 불안정하게 되어, 과전압에 의한 빈번한 실패(Fault)가 발생된다.^{[2][3]}

본 연구에서는 위와 같은 문제점을 개선할 수 있도록 다중 루프 제어기를 제시하였다. 제시된 제어기는 3개의 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째는 리액터 전류와 출력 전류의 차를 보상하며, 두 번째와 세 번째는 비례적분제어기를 사용하여 출력 전압에 포함된 리플을 감소시킴으로써, 안정화된 시스템을 구현하였다. 또한, 다른 크기의 부하 및 다른 종류의 부하에 대하여 DC-DC 컨버터 시스템의 제어 안정 및 원하는 특성을 기대할 수 있는 제어루프를 적용하고, 제어기가 포함된 전체시스템의 상태방정식의 특성방정식을 구하여 원하는 극점으로 위치시킬 수 있도록 계수를 선택하였다. 이 시스템의 특성을 확인하기 위해서 시뮬레이션과 실험을 통하여 결과를 비교 분석하였다.

2. 시스템 구성

2.1 DC-DC 컨버터 및 부하의 모델

DC-DC 컨버터의 전력부는 그림 1과 같다. 강압쇼퍼의 인덕턴스는 2가지의 설계조건에 의해 결정된다. 첫 번째의 설계조건은 정격부하의 10% 이상의 부하에 대하여 연속모드로 강압 쇼퍼를 운전하여야 한다. 두 번째 조건은 사용 가능한 인덕터의

코어에 의해 결정된다.

식 (1)은 임계 인덕턴스에 대한 방정식을 나타낸다.^[7]

$$L_s = \frac{R_L}{2f_s} (1-M) \quad (1)$$

실제 시스템은 70%의 시비율에 스위칭주파수 $f_s = 5$ [kHz], 부하저항 $R_L = 16$ [Ω] (정격 전력의 10%)이므로 인덕턴스 값은 480 [uH] 값이 된다.

커패시터는 출력 전압 리플이 1% 보다 작거나 $\Delta V_o < 3$ [V] (출력전압의 변동률)가 되도록 설계한다. 식 (2)는 커패시터의 값을 산출하기 위한 방정식이다.^[7]

$$C_s = \frac{M}{8L_s f_s^2 \Delta V_o} (V_{rec} - V_{dc}) \quad (2)$$

식(2)로부터 커패시터의 크기는 243 [uF]보다 큰 값으로 설정하면 된다. 본 연구의 시뮬레이션에서 적용한 시스템의 파라미터는 시스템의 출력전류 리플 및 출력전압의 맥동저감 및 출력단의 사고 발생시 출력전압의 상승을 저감하기 위해서 인덕턴스 및 커패시터의 크기를 산출치보다 큰 1.1 [mH]와 3500 [uF]으로 하였다.

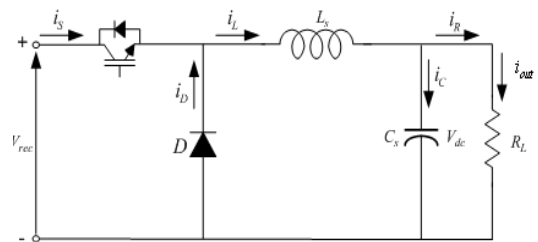


그림 1 DC-DC 컨버터
Fig. 1 The DC-DC converter

그림 1의 DC-DC 컨버터의 전력부에 대한 시스템에 상태방정식을 나타내면 식 (3)과 같다.^[7]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & -\frac{1}{R_L C_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{L_s} V_{rec} \quad (3)$$

2.2 DC-DC컨버터의 다중루프제어기

자기부상열차의 DC-DC 컨버터는 부하시스템에 안정한 전원을 공급하기 위해 과도한 부하 외란 조건에서도 DC 링크를 빠른 시간에 안정하게 유지하여야 한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서 극배치 제어가 바람직하다. 왜냐하면 PI제어기만으로는 DC-DC 컨버터의 극점을 원하는 위치로 배치시킬 수 없다. 따라서, 제어기는 식(4)와 같이 구성하였다^[7].

$$M(t) = -k_{pb}(i_L(t) - i_R(t)) + k_p(V_{ref}(t) - V_{dc}(t)) + k_i \int (V_{ref}(t) - V_{dc}(t)) dt \quad (4)$$

식 (4)의 제어기의 출력은 세 개의 제어항의 합으로 구성되어 있다. 첫 번째 항은, 비교적 완만하게 변하는 전류 i_L 과 출력 전류 i_R 의 차로 이루어져 있다. 이는 제어기의 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 k_{pb} 를 조절하여 출력전류에 발생하는 외란을 감쇠시킬 수 있다. 왜냐하면 시비율의 변화는 지령전압 V_{ref} 에 대하여 출력 전압 $V_{dc}(t)$ 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.

식 (5)는 식 (1)의 제어기를 포함하는 DC-DC 컨버터의 상태공간평균화모델형태로 표현하였다. 이때 제어기를 제외하고 시스템의 파라미터를 적용한 open-loop 시스템 극점 또는 고유치(eigenvalues)는 $s_1, s_2 = -4.8 \pm j510$ 이다.

폐루프 극점은 DC-DC컨버터의 지령전압 V_{ref} 를 상수로 가정하였을 때, 식(5)의 상태 공간평균환 시스템 행렬식으로부터 구할 수 있다^[7].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{dc} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_s} & \frac{V_{rec}}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & -\frac{1}{R_L C_s} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{dc} \\ M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_i \end{bmatrix} V_{ref} \quad (5)$$

$$A_{31} = -\frac{k_p}{C_s} + \frac{k_{pb}}{R_L C_s}$$

$$A_{32} = \frac{k_{pb}}{L_s} + \frac{k_p}{R_L C_s} - \frac{k_{pb}}{R^2 L C_s} - k_i$$

$$A_{33} = -\frac{k_{pb} V_{rec}}{L_s}$$

3. 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 극배치 제어를 이용한 알고리즘이 자기 부상열차 추진장치의 전원장치에 적용하였다. 전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 본 연구에서는 그림 3과 같이 MATLAB을 이용하여 제어 블록을 구성하였다.

표 1은 시뮬레이션에 이용된 강압 쇼퍼의 파라미터를 나타내고 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Parameters of simulation

강압쇼퍼의 파라미터			
V_{rec}	400[V]	V_{dc}	300[V]
f	5[kHz]	L_s	1.1[mH]
C_s	3500[uF]	R_L	16[Ω]

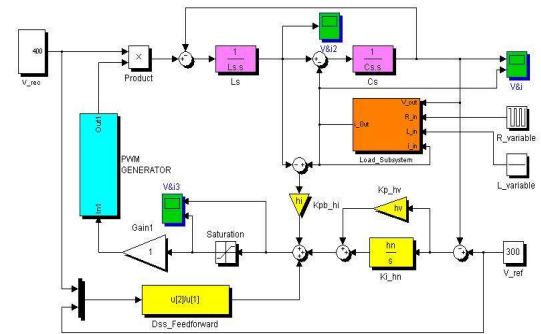


그림 3 DC-DC Converter의 Simulink 블록도
Fig. 3 Block diagram of DC-DC converter.

시뮬레이션에 이용된 전체적인 제어구조는 그림 3에 나타나 있는 것 같이 구성되어 있다. 그리고 본 연구에서의 시스템 파라미터는 표 1과 같이 입력전압 400[V]일 때 출력 전압은 300[V]로 하였다. 이러한 시스템에 대한 시뮬레이션의 목적은 55[kW]의 강압쇼퍼로 이루어진 DC 전원공급장치의 DC링크 전압 제어에 대한 특성을 알아보기 위한 것이다. 이때 시뮬레이터의 스위칭 주파수는 5[kHz], 리액터는 1.1[mH]로 하였다.

그림 3의 제어블록의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 4와 그림 5는 R부하의 변화에 대한 DC-DC 컨버터 시스템의 응답특성을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과로써 부하조건은 정격부하에 대하여 100%→10%→1%로 변화시켰다. 그림 4로부터 부하의 크기를 줄여감에 따라 시스템의 응답이 다소 느리지며, 자연주파수(natural frequency)가 커지는 것을 볼 수 있다.

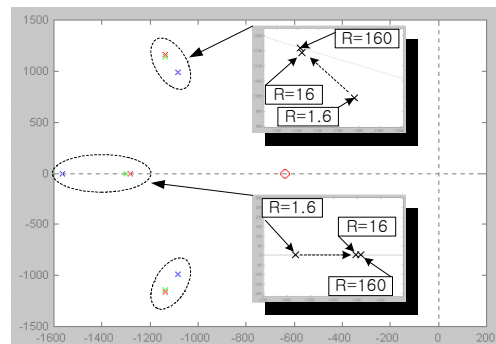


그림 4 R부하변화시 극점이동
Fig. 4 Pole movement of R load variability

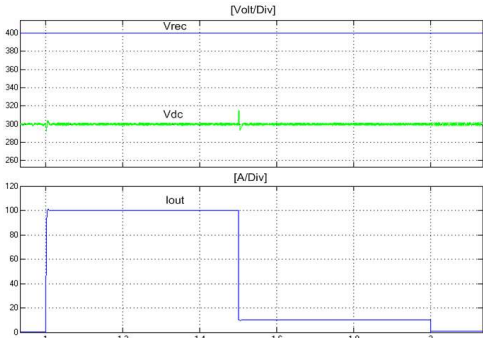


그림 5 출력전압 및 전류응답시험(R부하시)
Fig 5 Current response and output voltage

그림 5는 DC-DC 컨버터의 소프트 기동순간부터 초기 부상을 위한 급격한 부하외란 발생시 DC 링크의 변화 및 전류 크기의 변화를 나타낸 파형이다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기부상전류에 해당하는 100[A]의 급격한 전류외란 발생시 DC-DC 컨버터의 전압변동은 5[ms]사이 에 대략 5%의 전압변동만이 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

4. 실험결과

그림 6과 7은 자기부상열차의 부상에 필요한 전원을 각각의 Sub-chopper에 연결하여 부상제어기에서 마그네티로 급격히 전류 지령을 내린것이다 실험결과로부터 부하 연결시 극배치 제어를 적용하였을 경우 출력 전압 및 전류 파형이 개선됨을 볼 수 있다.

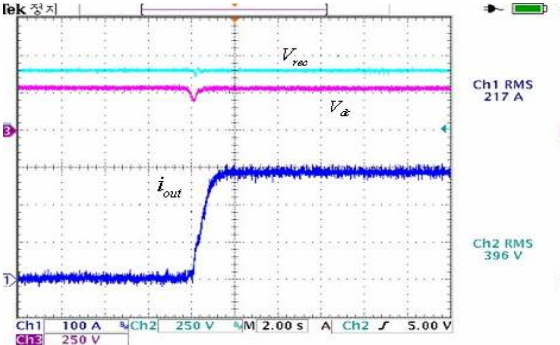


그림 6 Sub-chopper 연결시 출력전압 및 전류
Fig. 6 The output voltage and current when connecting to Sub-chopper

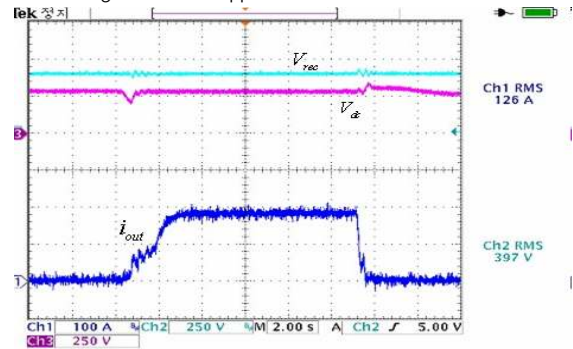


그림 7 Sub-chopper 연결시 출력전압 및 전류
Fig. 7 The output voltage and current when connecting to Sub-chopper

그림 8은 과부하시 보호동작의 파형이다. 자기부상열차의 부상에 필요한 전원장치의 출력단 과부하전류가(275[A]이상) 흘렀을 경우의 과부하 동작을 나타내고 있다.

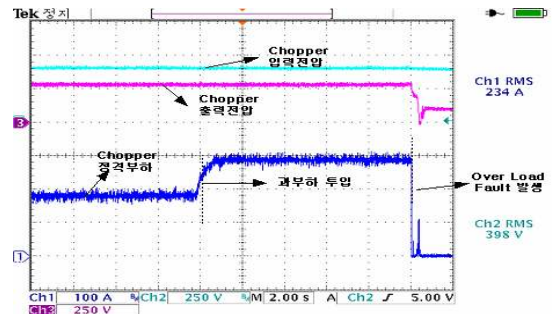


그림 8 과부하시 보호 동작
Fig. 8 The protection from overload

5. 결론

본 연구는 자기부상용 Sub-Chopper에 안정한 전원을 공급하기 위해 극배치제어 알고리즘을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제시한 극배치제어는 부상시 급격한 전류 외란으로 인해 DC-DC컨버터 출력전압 sag 및 과전압현상에 대하여 제어 특성을 향상시켰다.
- (2) 다중루프제어기를 구성하여 다양한 형태의 부하가 병렬로 배치되어있는 부하시스템의 동적인 변화에도 높은 제어 신뢰성을 제공하였다.
- (3) Bessel 전달함수 모델로부터 얻어진 극점을 이용함으로써 제어기 구성을 쉽게 최적화 할 수 있었다.
- (4) 근계적 및 시뮬레이션 결과로부터 제어기 및 시스템 파라미터의 설정이 본 논문에서 설계한 조건을 만족하는 것을 시스템 각부의 파형을 통하여 확인 할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 장석명의 3인, "자기부상열차", 대한전기학회 논문 집, 2000. 5.
- [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.
- [4] 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.
- [5] RaneNote, "A Bessel Filter Crossover and Its Relation to Others," the 105th convention of the Audio Eng. Soc, San Francisco, CA. 1998
- [6] 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
- [7] R.W Ashton, J.G. Ciezki, M.G. Badorf, "The Synthesis and Hardware Validation of DC-to-DC Converter Feedback Control," IEEE, pp65-71, 1998