

자기부상열차용 DC-DC 전원장치에 관한 연구

(A Study on DC-DC Power Supply for Magnetically Levitated Vehicle)

정준병* · 전기영 · 이훈구 · 한경희

(Choon-Byeong Chung · Kee-Young Jeon · Hoon-Goo Lee · Kyung-Hee Han)

요 약

본 논문은 자기부상열차용 전원의 문제점을 개선시키기 위해서 다중루프 제어를 제시하였다. 제시된 제어기는 3개의 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째는 입력전압의 변동에 대하여 보상할 수 있는 Feed Forward제어기이며 두 번째는 리액터 전류와 출력 전류의 차를 보상하며, 세 번째는 비례적분제어기를 사용하여 출력전압에 포함된 리플을 감소시키므로써, 안정화된 시스템을 구현하였다. 이 시스템의 특성을 확인하기 위해서 Matlab Simulink와 고성능 DSP소자인 TMS320F240을 이용하여 비교 분석하였다.

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 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. In order to verify the validity of the proposed multi-loop controller, simulation study was tried using Matlab simulink

Key Words : Maglev, feedforward, multi-loop

1. 서 론

자기부상열차(Magnetically Levitated Vehicle)는 전자기적인 힘으로 부상, 추진되므로 마찰 없이 운전

되는 새로운 교통수단이다. 따라서 기계적 진동 없이 조용히 주행할 뿐만 아니라, 기존의 지상 고속운송수단에 비해 우수한 주행성능을 지니고 있어, 더 빠른 속도와 가속도를 낼 수 있다. 또한 현재의 운송수단에 비해서 구조적으로 안전성이 높고 동력 발생 시스템은 별도의 회전-직선형 운동변환장치가 필요 없어 시스템은 신뢰성이 높고, 유지 보수비가 적은 특징을 가지고 있다[1]. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 실용화하기에는 해결해야 할 여러 문제점이 있으며, 그 중

* 주저자 : (주)한국종합엔지니어링 부사장
Tel : 031-420-8743, Fax : 031-420-8718
E-mail : chungcb@daum.net
접수일자 : 2004년 7월 16일
1차심사 : 2004년 7월 20일
심사완료 : 2004년 10월 14일

하나는 차량부상용 전원장치의 안정화이다. 자기부상 열차의 부상 전원장치는 강압 초퍼의 형태로 구성되어 있으며, 24개의 부상 제어용 초퍼가 주 전원장치에 연결된다. 부상 제어용 초퍼는 초기 부상시 전류의 흐름이 매우 급격하게 변하게 됨으로써, 주 전원 공급 장치의 DC 공급전압이 불안정하게 되어, 과부하 전압과 전류에 의한 빈번한 Fault가 발생된다[2,3]. 본 연구에서는 위와 같은 문제점을 개선할 수 있도록 다중루프 제어를 제시하였다. 제시된 제어기는 3개의 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째는 입력전압의 변동에 대하여 보상할 수 있는 Feed Forward제어기이며, 두 번째는 리액터 전류와 출력 전류의 차를 보상하며, 세 번째는 비례적분제어기를 사용하여 출력전압에 포함된 리플을 감소시키므로써, 안정화된 시스템을 구현하였다. 이 시스템의 특성을 확인하기 위해서 Matlab Simulink와 고성능 DSP소자인 TMS320F240을 이용하여 비교 분석하였다. 그 결과, 제안한 제어기는 Feed Forward제어기에 의한 출력전압의 안정, DB(Dynamic Breaker)부착으로 과전압에 의한 fault 현상의 제거, 전류리미트 제어기의 강인성등을 확인하였다.

2. 시스템 및 다중루프제어기 설계

2.1 자기부상열차의 구성도

그림 1은 자기부상열차의 전력구성도를 나타내는 그림이다.

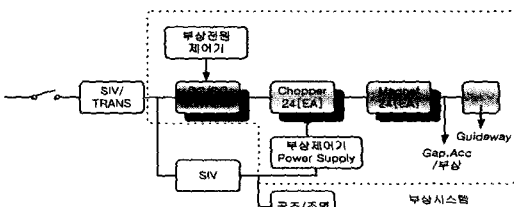


그림 1. 자기부상열차의 전력 구성도
Fig. 1. The power configuration diagram of magnetically Levitated Vehicle

자기부상열차에서의 부상은 Gap Sensor와 Acceleration Sensor를 이용하여 지지용 선로와 일정 간격을 유지하기 위하여 마그네트에 흐르는 전류를

부상제어기에서 전류제어를 통하여 제어를 하게 된다. 이와 같은 안정된 제어를 하기 위해서는 무엇보다 전력시스템의 공급전압이 안정화하면 할수록 부상제어 측면에서 제어기 설계가 용이하게 된다[4,5].

2.2 다중루프제어기의 설계

그림 2는 제안된 자기부상열차의 제어블럭도를 나타내고 있다. 제어부는 일정 전압을 제어할 수 있는 전압제어루프를 inner루프로 하였고, 과전류시 출력 전류를 제한할 수 있는 전류제어기를 outer 루프로 구성하였다. 따라서 DC 링크 전압을 보다 안정화시킬 수 있었다.

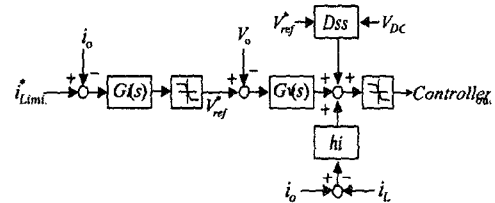


그림 2. 강압초퍼의 제어블럭도
Fig. 2. The control block-diagram of step down chopper

2.2.1 전압제어기

전압 제어기의 구성은 입력 전압의 변화에 따라 출력 지령값을 보상할 수 있는 Feed Forward $Dss(t)$ 항과, 리액터에 흐르는 전류 i_L 과 부하에 흐르는 전류 i_o 에 전류차에 대한 보상항, 그리고 PI 제어기 $Gv(s)$ 항으로 이루어져 있으며 전압제어기의 수식 $d(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다[6].

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

여기에서, $Dss(t)$ 는 식 (2)와 같다.

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

2.2.2 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 적분기가 포함되어 있으므로 적분기의 적분값은 그 값이 제한 되지 않고 제어기의 상한값(상한, 하한)을 넘어 쌓이게(Wind-up)된다. 이 경우 제어기 입력의 부호가 반전될 경우에도 쌓여있는 적분기의 내부 적분값으로 인하여 제어기 출력이 입력에 대해 제대로 반응하지 않거나 그 응답이 느려져서(Sluggish) 현상이 발생한다. 따라서 Anti-Windup 제어를 적용하여 이러한 현상에 대하여 대처할 수 있도록 하였다.

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

$$\begin{aligned} Err(s) &= V'(s) - V_{ref}^*(s) \\ V'(s) &= K_p e(s) + u_i(s) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_i(s) &= \left(\frac{K_i}{s} \right) \{ e(s) - K_a Err(s) \} \\ u_i(n) &= u_i(n-1) + T_s K_i \{ e(n) - K_a Err(n) \} \\ V'(n) &= K_p e(n) + u_i(n) \end{aligned} \quad (4)$$

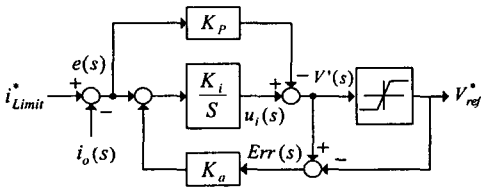


그림 3. Anti-windup 전류제어기
Fig. 3. The current controller with anti-windup controller

그림 3의 이득 K_a 에 의해서 제한되는 항은 제어기의 출력이 제한되지 않는 경우에는 동작하지 않는데 이 때는 Anti-Windup이 없는 PI제어기와 동일하다. 제어기의 출력이 제한되는 경우에는 제어기의 출력과 실제로 인가되는 출력사이의 오차가 이득 K_a 를 통하여 제한되어 적분항을 감소시키게 된다. 이러한 작용으로 인하여 Anti-Windup이 있는 제어기는 Anti-Windup이 없는 제어기에 비하여 빠른 과도 상태 응답과 안정성을 보장해준다.

2.3 부상 시스템의 구성

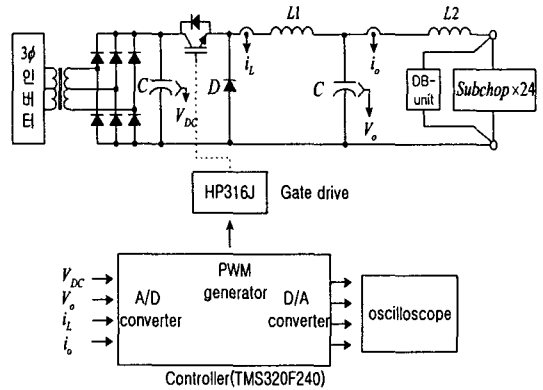


그림 4. 전체 시스템의 구성
Fig. 4. Scheme of all system

그림 4는 마이크로프로세서의 게이팅 신호를 받아 컨버터로부터 공급되는 직류전원을 자기부상열차의 부상에 필요한 직류전원으로 변환하는 부분이다. 시스템의 전력회로는 그림 4에 나타낸 것과 같이 컨버터 및 강압초퍼를 중심으로하여 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.

강압초퍼는 빠른 응답특성과 출력전압이나 전류에 리플이 적어야 하며 자기부상열차의 부상시 매우 빈번한 Fault가 이루어지므로 충분한 과부하 용량을 갖도록 설계하여야 한다. 이와 같은 요구를 고려하여 자기부상열차에 적용하였다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 다중루프제어기를 이용한 알고리즘이 자기 부상열차 추진장치의 전원장치에 적용 가능함을 시뮬레이션을 통해 고찰하였다. 전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 본 연구에서는 그림 3-1과 같이 MATLAB을 이용하여 제어 블록을 구성하였다.

표 1은 시뮬레이션에 이용된 강압 초퍼의 파라미터를 나타내고 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameter

강압초퍼의 파라미터			
V_{in}	400[V]	V_o	300[V]
f_s	2.5[kHz]	L_f	2.2[mH]
C	3500[uF]	R	2[Ω]

시뮬레이션에 이용된 전체적인 제어구조는 그림 4에 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 강압초퍼로 이루어진 DC 전원공급장치의 DC링크 전압 제어에 대한 특성을 알아보기 위한 것이다. 이때 시뮬레이터의 스위칭 주파수는 2.5[kHz], 리액터는 2.2[mH]로 하였다.

그림 5는 일반적인 PI 제어기로 구성된 회로에 있어서 출력 전압 및 전류를 나타내고 있다. 시험 조건은 정격 부하의 10[%](16.36Ω)-100[%](1.636Ω)-10[%](16.36Ω)로 부하를 투입하였고, 이때 전류제어의 전류 제한치는 100[A]로 하였다.

그림 5와 그림 6의 실험결과로부터 전류리플 보상 제어기를 적용하였을 경우 전류 리플 보상에 의해 출력 전압 및 전류 파형이 개선됨을 볼 수 있다.

그림 7은 Dss(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.

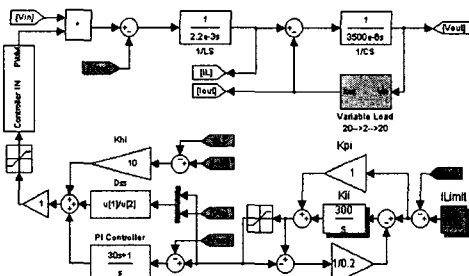


그림 4. 제안된 다중루프 제어블록도
Fig. 4. The block-diagram for proposed multi-loop controller

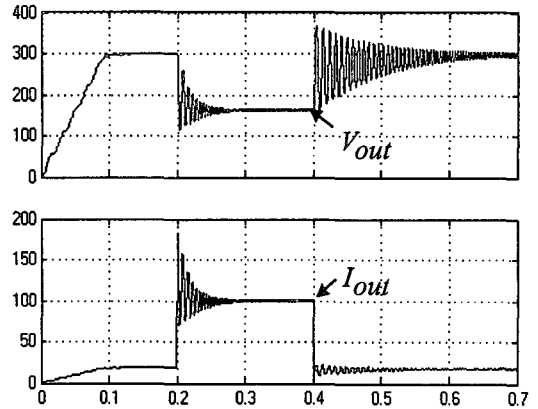


그림 5. PI 제어기만 적용한 경우
Fig. 5. The PI controller without current ripple compensation

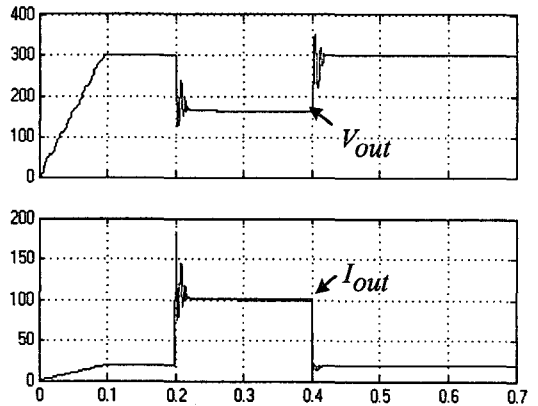


그림 6. 전류리플 보상 제어기를 적용한 경우
Fig. 6. The PI controller with current ripple compensation

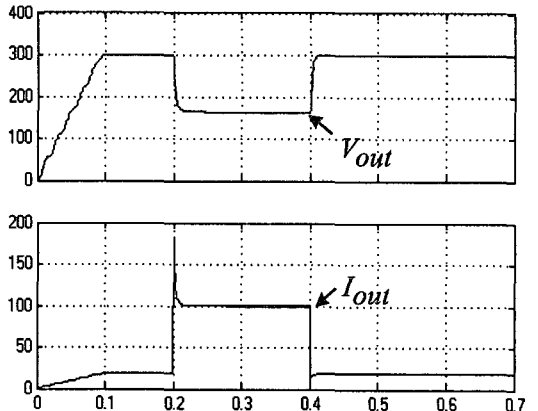


그림 7. 다중루프제어기를 적용한 경우
Fig. 7. The multi-loop controller

자기부상열차용 DC-DC 전원장치에 관한 연구

그림 8은 식(1)에 해당하는 제어를 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 됨을 알 수 있다.

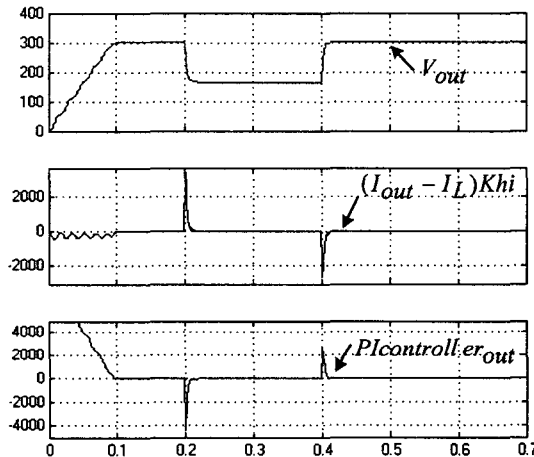


그림 8. 다중루프제어기를 적용한 경우 제어기의 각부 파형
Fig. 8. The each part waveform of the controller with multi-loop controller

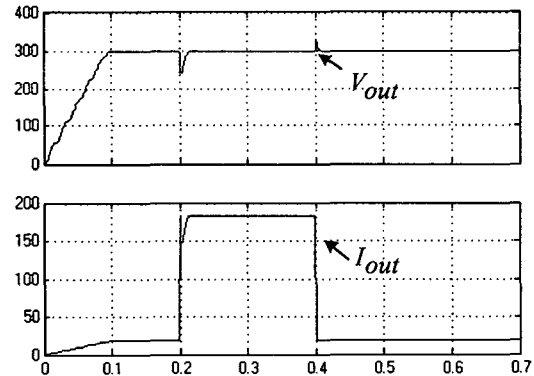


그림 9. 다중루프제어기 사용시, 출력전압, 전류 파형
Fig. 9. Output voltage and current waveform of the controller with multi-loop controller

그림 9는 본 시스템에 적용할 제어기 형태로서 전류는 200[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.

3.2 실험결과

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

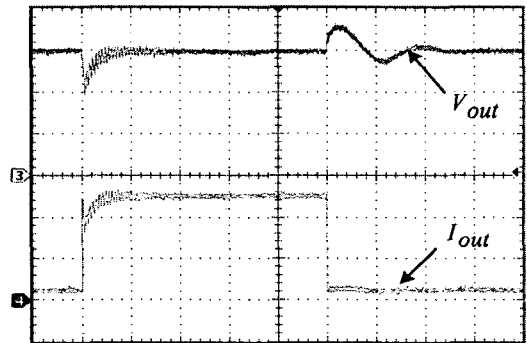


그림 10. PI 제어기만 적용한 경우 (CH3 : 100(V/Div), CH4 : 50(A/Div) TD : 200(msec))
Fig. 10. The PI controller without current ripple compensation

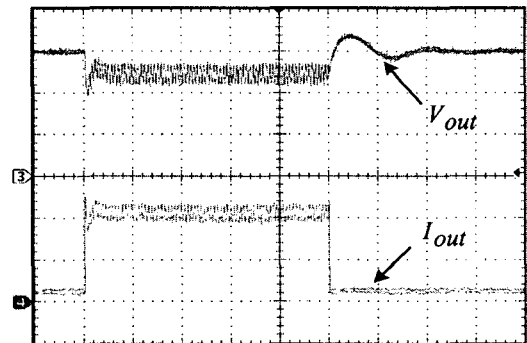


그림 11. PI제어기만 적용시(100[A] 전류제한시)
Fig. 11. The PI controller without current ripple compensation

그림 10과 그림 11은 PI제어기만을 적용했을 경우의 출력전압과 전류의 파형이다. 그림 10은 단순 PI 제어기만을 사용했을 경우이고, 그림 11은 100[A] 전류제한시의 파형으로 전류파형이 100[A] 이상 상승하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 12와 그림 13의 실험결과로부터 전류리플 보상 제어기를 적용하였을 경우 전류 리플 보상에 의해 출력 전압 및 전류 파형이 개선됨을 볼 수 있다.

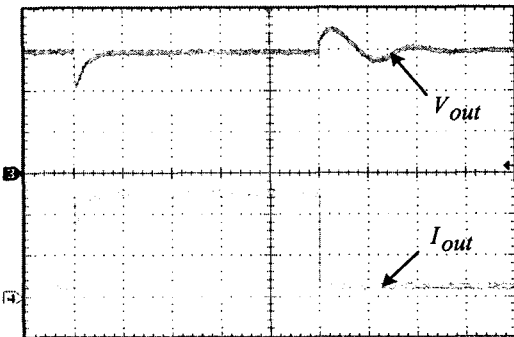


그림 12. 전류리플 보상제어기를 적용한 경우
(CH3 : 100(V/Div), CH4 : 50(A/Div)
TD : 200(msec))

Fig. 12. The PI controller with current ripple compensation

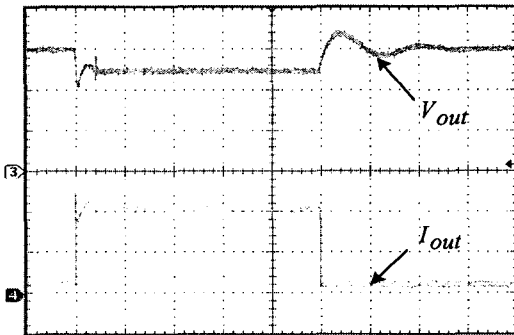


그림 13. 전류리플 보상제어기를 적용한 경우
(100[A] 전류제한시) (CH3 : 100(V/Div),
CH4 : 50(A/Div) TD: 200(msec))

Fig. 13. The PI controller with current ripple compensation

그림 14는 $D_{ss}(t)$, 전류 리플 보상기 및 PI 제어기를 통합한 제어기를 적용하였을 때 출력 전압 및 전류 파형을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 출

력 전압의 과도특성 및 정상상태의 특성이 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다.

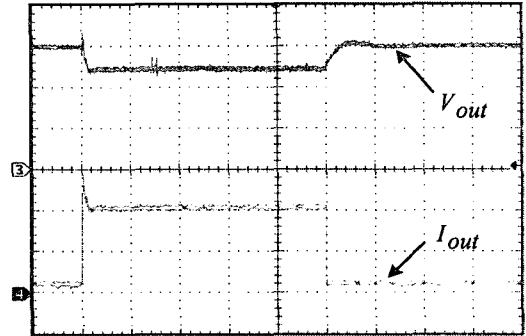


그림 14. 다중루프제어기 적용시(100[A]전류제한)
(CH1 : 5(V/Div), CH2 : 5(V/Div),
CH3 : 100(V/Div), TD : 200(msec))

Fig. 14. The multi-loop controller

그림 15는 식 (1)에 해당하는 제어기를 사용하였을 경우 제어기의 출력과 시스템의 출력 전압 파형을 나타낸 것이다. 첫 번째 파형은 출력전압이며, 세 번째 파형은 리액터 전류와 출력 전류 사이의 차를 보상한 항이며, 두 번째 항은 비례-적분제어기(PI Controller)의 보상항이다. 비례-적분제어기는 시스템을 안정화시키며 출력전압의 오차를 최소화한다. 출력 파형으로부터 전류 리플 보상은 부하의 급변시 출력 전압을 보상하며, $D_{ss}(t)$ 는 과도시 및 부하 급변시 모두 동작하여, DC 링크 전압을 안정화시키게 됨을 알 수 있다.

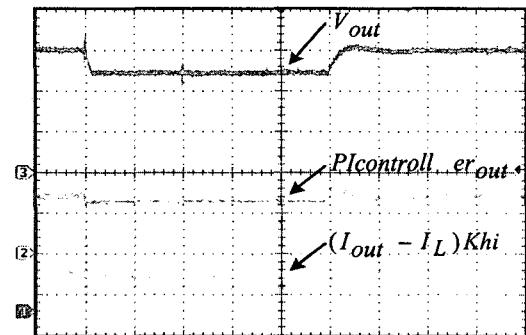


그림 15. 다중루프제어기 적용시 제어기 출력
(CH1 : 5(V/Div), CH2 : 5(V/Div),
CH3 : 100(V/Div), TD 200(msec))

Fig. 15. The each part waveform of the controller with multi-loop controller

자기부상열차용 DC-DC 전원장치에 관한 연구

그림 16은 전류 Limit는 200[A]로 하였을 경우, 부하 급가변시 출력 전압 파형 및 출력 전류 파형을 나타낸 것으로써 비교적 양호한 제어기의 특성을 나타내고 있다.

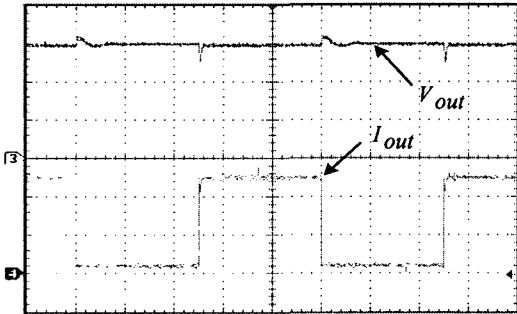


그림 16. 다중루프제어기 적용시 (전류제한 200[A])
(CH3 : 100[V/Div], CH4 : 50[A/Div]
TD : 400[msec])
Fig. 16. The multi-loop controller)

그림 17과 그림 18은 자기부상열차의 부상에 필요한 전원을 각각의 Sub-chopper(24대)에 연결하여 부상제어기에서 마그네트에 급격히 전류 지령을 내린 것이다. 이때도 안정된 출력전압과 전류를 볼 수 있다. 그림 19는 급격한 전류의 변화에 의해 DB의 동작파형을 나타내고 있다. 전류가 흐르고 있는 상태에서 급격한 부하의 감소(출력전류가 0[A]로 되었을 때)로 되면 $L \frac{di}{dt}$ 에 의해 출력단의 전압은 상승하게 된다. 따라서 DB를 이용하여 출력전압을 안정화시켜야 된다.

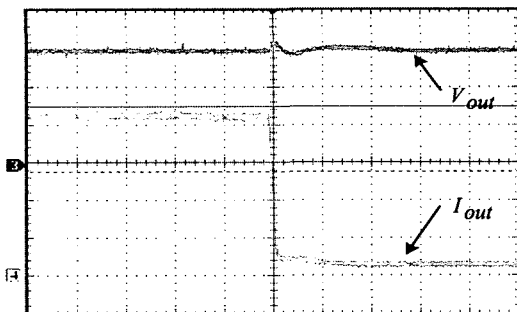


그림 17. Sub-chopper 연결시 출력전압 및 전류
(CH3 : 100[V/Div], CH4 : 20[A/Div]
TD : 200[msec])
Fig. 17. The output voltage and current when connecting to Sub-chopper

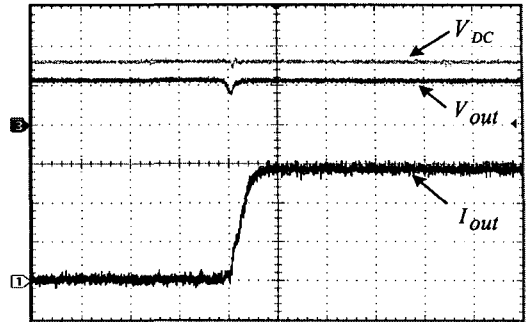


그림 18. sub-chopper 연결시 출력전압 및 전류
(CH1 : 100[A/Div], CH3 : 250[V/Div],
CH4 : 250[V/Div], TD : 200[msec])
Fig. 18. The output voltage and current when connecting to Sub-chopper

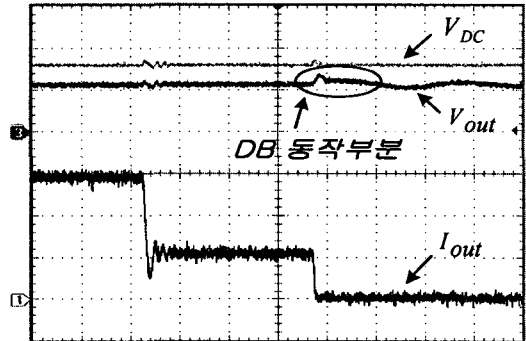


그림 19. 출력전류변화시 V_{DC} , V_{out} , I_{out} 파형
(CH1 : 100[A/Div], CH3 : 250[V/Div],
CH4 : 250[V/Div], TD : 200[msec])
Fig. 19. The V_{DC} , V_{out} , I_{out} waveform when the output current is changed

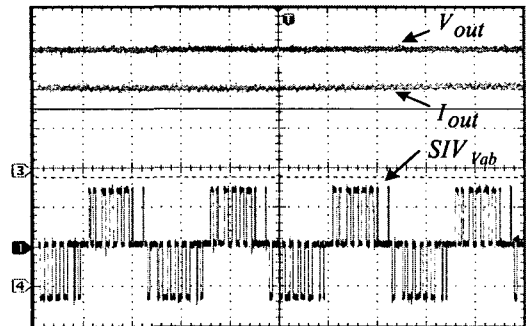


그림 20. Static inverter Vab상과 출력전압 및
출력전류(CH1 : 500[V/Div], CH3 :
100[V/Div], CH4 : 20[A/Div], TD :
1[msec])
Fig. 20. Static inverter Vab, output voltage,
output current waveform

그림 2의 시스템 회로도에서 첫 부분에 있는 static inverter를 이용하여 chopper 앞단의 DC 400[V]를 유지하기 위해서 제어하게 된다.

그림 20의 1번 파형이 static inverter의 V_{ab} 상의 전압파형이며 3번은 출력전압 파형이고 4번은 출력 전류의 파형을 나타내고 있다.

그림 21은 과부하시 보호 동작의 파형이다. 자기 부상열차의 부상에 필요한 전원장치의 출력단 과부하전류(275[A]이상)가 흘렀을 경우의 과부하 보호 동작을 나타내고 있다.

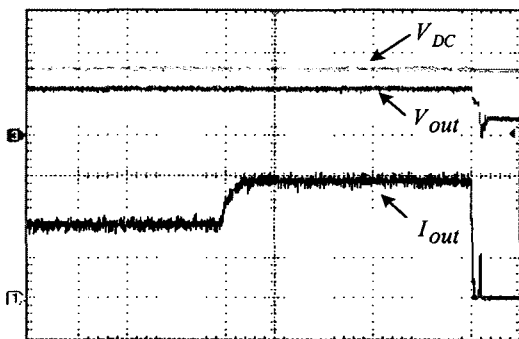


그림 21. 과부하시 보호 동작(CH1 : 100(A/Div), CH3 : 250(V/Div), CH4 : 250(V/Div), TD : 200(msec))

Fig. 21. The protection from overload

4. 결 론

본 연구는 자기부상용 Sub-Chopper에 안정한 전원을 공급하기 위해 다중루프제어 알고리즘을 제시하여 부상시 급격한 전류 외란으로인해 DC-DC컨버터 출력전압 sag 및 과전압현상에 대하여 제어특성을 향상시켰다. 또한, DB를 사용하여 자기부상열차의 이상현상에 의해 발생하는 Fault 현상을 제거하여 시스템의 신뢰도를 향상시켰고, 전류리미트 제어기를 사용함으로써, Sub-chopper에 의해 발생하는 과도과부하 전류로부터 시스템을 강인하도록 제어하였다.

References

[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.
- [4] S.M. Jang, "Magnetically Levitated Vehicle", Trans KIEE, 2000. 5.
- [5] KERI "Levitated Control Technique", 1993. 7.
- [6] T. Hata, H. Kanehara, G. Iijima, Y. Nishi, "Anti-Slip Control fo VVVF Inverter Driven EMLs", STECH, Vol.2 pp.255-260, November, 1993.

◇ 저자소개 ◇

정춘병 (鄭春炳)

1948년 7월 4일생. 명지대학교 전기공학과 졸업. 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 명지대학교 대학원 전기공학과 박사과정, (주)신한 이사, (주)한국엔지니어링 부사장. 건축전기설비·전기용융기술사, 한국조명설비학회 임원. 한국기술사회 이사.

E-mail : chungcb@daum.net

전기영 (全基英)

1971년 8월 15일생. 1994년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1998년 명지대학교 전기공학과 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 중소기업진흥공단 컨설턴트 & 교수.

E-mail : jky@mju.ac.kr

이훈구 (李勳九)

1948년 4월 27일생. 1971년 명지대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1992년 미국 아리조나 주립대학교 객원교수. 현재 용인송담대학 조명인테리어학과 교수.

E-mail : hglee@ysc.ac.kr

한경희 (韓慶熙)

1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 명지대 전기제어정보공학부 교수.

E-mail : hkh@mju.ac.kr