

자기부상열차용 DC-DC 전원장치에 관한 연구

(A Study on DC-DC Power Supply for Maglev)

정 춘 병* · 조 주 현 · 조 정 민 · 전 기 영 · 이 상 집 · 오 봉 환 · 이 훈 구 · 한 경 희

(Choon-Byung Chung · Ju-Hyun Cho · Jung-Min Jho · Kee-Young Jeon · Sang-Chip Lee ·

· Bong-Hwan Oh · Hoon-Gu Lee · Kyung-Hee Han)

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.

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 진동 없이 조용히 주행할 뿐만 아니라, 기존의 지상 고속운송수단에 비해 우수한 곡선 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 가동 신뢰성이 높고 유지 보수비가 적은 것이 큰 특징을 가지고 있다.[1] 그러나, 이러한 장점에도 불구하고 아직 실용화하기에 기술적인 미흡한 점이 있어 실용화하지 못하고 있다. 이러한 어려움 중에 하나는 차량을 부상하는데 필요한 안정된 전원을 공급해주는 전원장치에 있다. 자기 부상열차의 부상 전원장치는 강압 초과퍼의 형태로 구성되어 있다. 이러한 주 전원장치에 연결된 부하는 부상 제어용 초과퍼(24EA)가 다수 연결이 된다. 부상 제어용 초과퍼는 초기 부상시 전류의 흐름이 매우 급격하게 변하게 됨으로써, 주 전원 공급 장치의 DC 공급전압이 불안정하게 된다. 따라서, 주 전원장치는 매우 빈번하게 Fault신호를 내게 된다.[2][3] 본 연구에서는 위와 같은 난점을 개선할 수 있도록 수정된 다중루프제어기를 제시하였다. 제시된 제어기는 3 개의 항으로 구성되어 있다. 첫 번째 항은 입력전압의 변동에 대하

여 보상할 수 있는 Feed Forward항이며 두 번째 항은 리액터 전류와 출력 전류 사이의 차를 보상한 항이며, 마지막으로 세 번째 항은 실제 출력된 전압에서 나타나는 리플 현상을 제어하기 위해 사용된 비례 적분 항이다. 따라서 비례-적분제어기(PI Controller)는 시스템을 안정화시키며 출력전압의 오차를 최소화한다.

이러한 시스템의 각부 특성을 확인하기 위해서 Matlab Simulink를 이용하였다. 이 결과를 비교, 분석하여 제안한 제어기의 우수성과 강인함을 확인하였고, 이를 구현하기 위하여 고성능 DSP소자인 TMS320F240을 이용하였다.

2. 시스템 구성 및 다중루프제어기 설계

2.1 자기부상열차의 전력시스템의 구성도

그림 2-1은 자기부상열차의 전력구성도를 나타내는 그림이다. 자기부상열차에서의 부상은 Gap Sensor와 Acceler -ation Sensor를 이용하여 지지용 선로와 일정간격을 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.

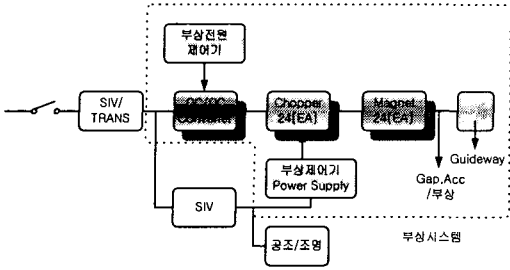


그림 2-1 자기부상열차의 전력 구성도
 Fig. 2-1 The power configuration diagram of magnetically Levitated Vehicle

2.2 부상 시스템의 구성

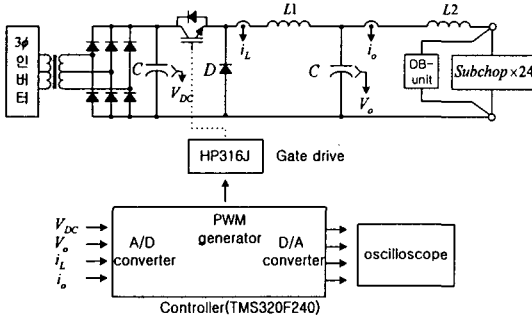


그림 2-2 전체 시스템의 구성
 Fig. 2-2 Scheme of all system

그림 2-2는 마이크로프로세서의 게이팅 신호를 받아 컨버터로부터 공급되는 직류전원을 자기부상 열차의 부상에 필요한 직류전원으로 변환하는 부분이다. 시스템의 전력회로는 그림 2-2에 나타낸 것과 같이 컨버터 및 강압쇼퍼를 중심으로하여 입력전압에 대한 직류 평활용 필터와 출력전압 및 전류에 대한 필터회로로 구성되어 있다.

위 그림과 같이 실제의 쇼퍼 회로에 추가된 L_2 는 부하인 Sub-chopper가 초기 충전시와 초기 부상시에 과전류로 인해서 Under voltage fault의 발생을 방지하기 위한 것이다.

강압쇼퍼는 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.

2.3 다중루프제어기의 설계

그림 2-3은 제안된 자기부상열차의 제어블록도를

나타내고 있다. 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.

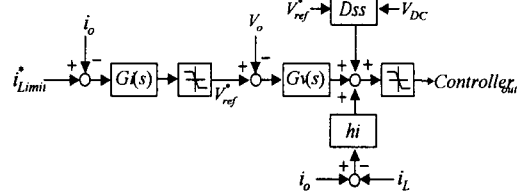


그림 2-3 강압쇼퍼의 제어블록도
 Fig. 2-3 The control block-diagram of step down chopper

2.3.1 전압제어기

전압 제어기의 구성은 입력 전압의 변화에 따라 출력 지령값을 보상할 수 있는 Feed Forward $D_{ss}(t)$ 항과, 리액터에 흐르는 전류 i_L 과 부하에 흐르는 전류 i_o 에 전류차에 대한 보상항, 그리고 PI 제어기 $G_V(s)$ 항으로 이루어져 있으며 식 (4-1)과 같이 표현된다. [1]-[3]

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

여기에서, $D_{ss}(t)$ 는 식 (4-2)와 같다.

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

2.3.2 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 정상적인 조건에서 Wind-up 현상이 발생하게 된다. Wind-up 현상이란 제어기의 출력이 제한되는 값에 관계없이 출력의 최대값 혹은 최소값에 머물러 있기 때문에 제한루프는 실제적으로는 끊어진 것과 같은 현상이 발생한다. 이는 적분항이 오차를 계속적으로 적분하기 때문에, 적분항이 매우 커지는 현상을 말한다. 이러한 현상은 오차의 부호를 바꾸기에는 많은

시간이 필요하게 된다. 따라서, Anti-Windup 제어를 적용하여 이러한 현상에 대하여 대처할 수 있도록 하였다.

그림 2-4는 Anti-Windup 제어기가 있는 블록도이며 전달함수는 식(3)과 같고 식(3)를 Backward Transform으로 변환하면 식(4)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 Err(s) &= V'(s) - V_{ref}^*(s) \\
 V'(s) &= K_p e(s) + u_i(s) \quad (3) \\
 u_i(s) &= \left(\frac{K_i}{s}\right) \{e(s) - K_a Err(s)\} \\
 u_i(n) &= u_i(n-1) + T_s K_i \{e(n) - K_a Err(n)\} \quad (4) \\
 V'(n) &= K_p e(n) + u_i(n)
 \end{aligned}$$

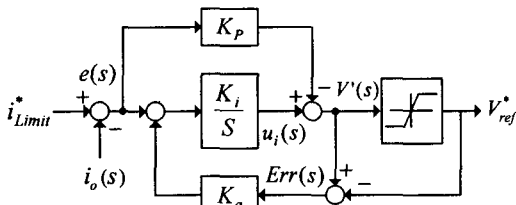


그림 2-4 Anti-windup 전류제어기
Fig. 2-4 The current controller with anti-windup controller

그림 2-4의 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 과도상태 응답과 안정성을 보장해준다.

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 제어블록을 구성하였다.

표 3.1은 시뮬레이션에 이용된 강압 초퍼의 파라미터를 나타내고 있다.

표 3.1 시뮬레이션 파라미터
Fig. 3.1 Simulation parameter

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

시뮬레이션에 이용된 전체적인 제어구조는 그림 2-1에 나타나 있는 것 같이 구성되어 있다. 그리고, 본 연구에서의 시스템 파라미터는 표 3.1과 같이 입력전압 400[V]일 때 출력 전압은 300[V]로 하였다. 이러한 시스템에 대한 시뮬레이션의 목적은 55[kW]의 강압초퍼로 이루어진 DC 전원공급 장치의 DC링크 전압 제어에 대한 특성을 알아보기 위한 것이다. 이때 시뮬레이터의 스위칭 주파수는 2.5[kHz]로 하였다.

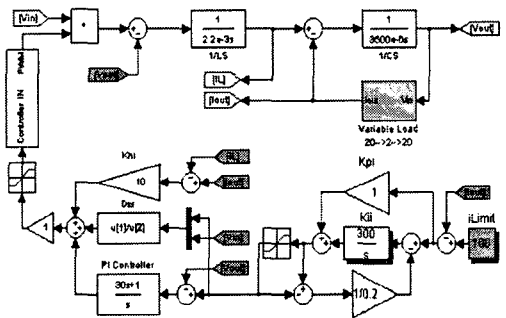


그림 3-1 제안된 다중루프 제어블록도
Fig. 3-1 The block-diagram for proposed multi-loop controller

그림 3-2는 일반적인 PI 제어기로 구성된 회로에 있어서 출력 전압 및 전류를 나타내고 있다. 시험 조건은 정격 부하의 10% (16.36 Ω) - 100% (1.636 Ω) - 10% (16.36 Ω)로 부하를 투입하였고, 이때 전류제어기의 전류 제한치는 100[A]로 하였다.

그림 3-2와 그림 3-3의 실험결과로부터 전류리플 보상 제어기를 적용하였을 경우 전류 리플 보상에 의해 출력 전압 및 전류 파형이 개선됨을 볼 수 있다. 그림 3-4는 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 과도 특성 및 정상상태의 특성이 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다. 그림 3-5는 식(1)에 해당하는 제어기를 사용하였을 경우 제어기의 제어항, 각부

의 파형을 나타낸 것이다.

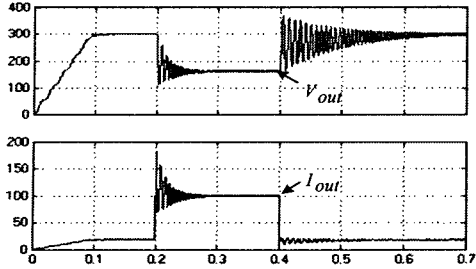


그림 3-2 PI 제어기만 적용한 경우
Fig. 3-2 The PI controller without current ripple compensation

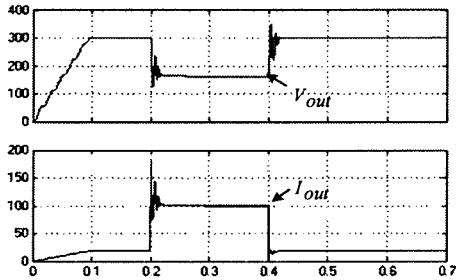


그림 3-3 전류리플 보상 제어기를 적용한 경우
Fig. 3-3 The PI controller with current ripple compensation

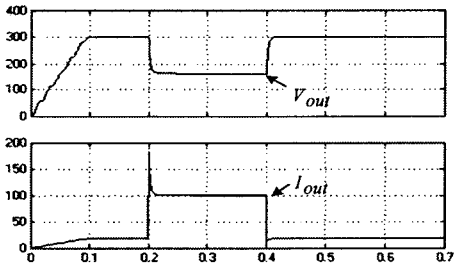


그림 3-4 다중루프제어기를 적용한 경우
Fig. 3-4 The multi-loop controller

첫 번째 그림은 출력전압이며, 두 번째 파형은 전류 리플 보상에 의한 보상 전압함, 세 번째 파형은 입력 전압에 대한 출력 전압을 보상할 수 있는 $D_{ss}(t)$ 제어항을 나타내고 있다. 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 3-6은 본 시스템에 적용할 제어기 형태로서 전류는 200[A]로 하였을 경우에 부하 급변시 출력 전압 파형 및 출력 전류 파형을 나타낸 것으로서 비교적 양호한 제어기의 특성을 나타내고 있다. 따라서, 본 시스템에서 요구하는 동특

성에 적용하는 특성을 얻을 수 있었다.

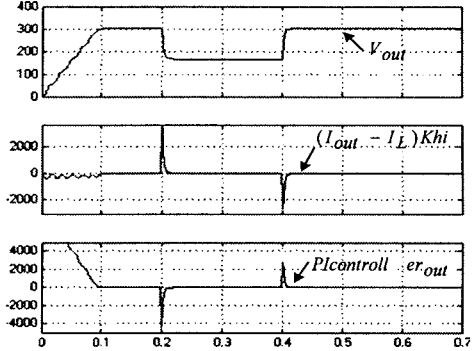


그림 3-5 다중루프제어기를 적용한 경우 제어기의 각부 파형

Fig. 3-5 The each part waveform of the controller with multi-loop controller

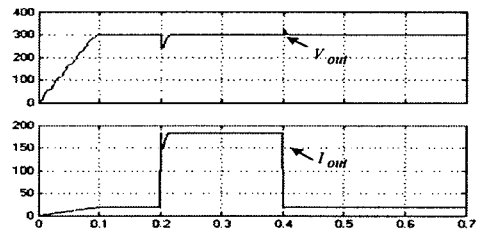


그림 3-6 다중루프제어기를 사용했을 때의 출력전압과 출력전류

Fig. 3-6 Output voltage and current waveform of the controller with multi-loop controller

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]하였다.

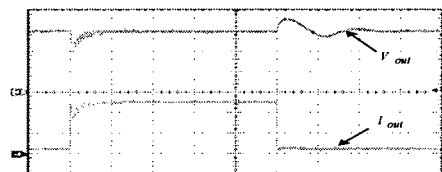


그림 3-7 PI 제어기만 적용한 경우
(CH3: 100[V/Div], CH4: 50[A/Div] TD: 200[msec])
Fig. 3-7 The PI controller without current ripple compensation

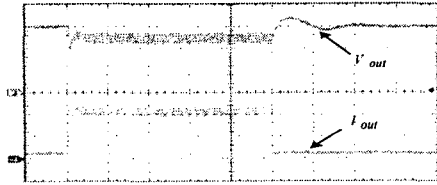


그림 3-8 PI제어기만 적용시(100A 전류제한시)
Fig. 3-8 The PI controller without current ripple compensation

그림 3-9와 그림 3-10의 실험결과로부터 전류리플 보상 제어기를 적용하였을 경우 전류 리플 보상에 의해 출력 전압 및 전류 파형이 개선됨을 볼 수 있다.

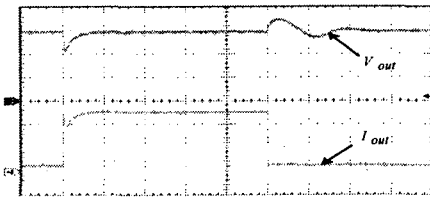


그림 3-9 전류리플 보상제어기를 적용한 경우
(CH3: 100[V/Div], CH4: 50[A/Div] TD: 200[msec])
Fig. 3-9 The PI controller with current ripple compensation

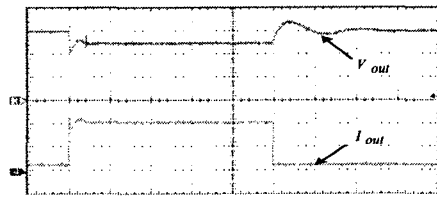


그림 3-10 전류리플 보상제어기를 적용한 경우
(100A 전류제한시)
(CH3: 100[V/Div], CH4: 50[A/Div] TD: 200[msec])
Fig. 3-10 The PI controller with current ripple compensation

그림 3-11는 $D_{ss}(t)$, 전류 리플 보상기 및 PI 제어기를 통합한 제어기를 적용하였을 때 출력 전압 및 전류파형을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 출력 전압의 과도특성 및 정상상태의 특성이 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다. 그림 3-12은 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 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 3-13은 전류 Limit는 200[A]로 하였을 경우, 부하 급가변시 출력 전압 파형 및 출력 전류 파형을 나타낸 것으로써 비교적 양호한 제어기의 특성을 나타내고 있다.

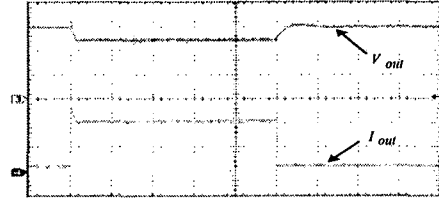


그림 3-11 다중루프제어기를 적용시
(100A전류 제한시)
(CH1: 5[V/Div], CH2: 5[V/Div], CH3: 100[V/Div], TD: 200[msec])
Fig. 3-11 The multi-loop controller

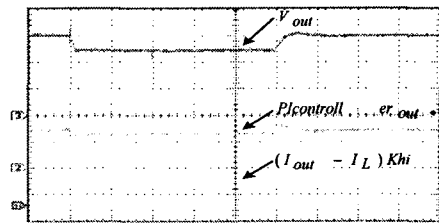


그림 3-12 다중루프제어기 적용시 제어기 출력
(CH1: 5[V/Div], CH2: 5[V/Div], CH3: 100[V/Div], TD 200[msec])
Fig. 3-12 The each part waveform of the controller with multi-loop controller

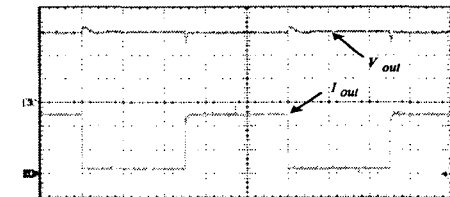


그림 3-13 다중루프제어기 적용시
(전류제한 200[A])
(CH3: 100[V/Div], CH4: 50[A/Div] TD: 400[msec])
Fig. 3-13 The multi-loop controller

그림 3-14와 그림 3-15는 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 3-16은 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 안정화 시켜야 된다.

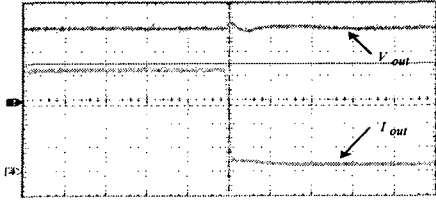


그림 3-14 Sub-chopper 연결시 출력전압 및 전류
(CH3: 100[V/Div], CH4: 20[A/Div] TD: 200[msec])
Fig. 3-14 The output voltage and current when connecting to Sub-chopper

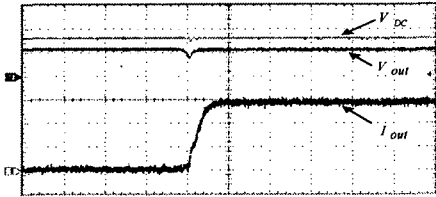


그림 3-15 sub-chopper 연결시 출력전압 및 전류
(CH1: 100[A/Div], CH3: 250[V/Div],
CH4: 250[V/Div], TD: 200[msec])
Fig. 3-15 The output voltage and current when connecting to Sub-chopper

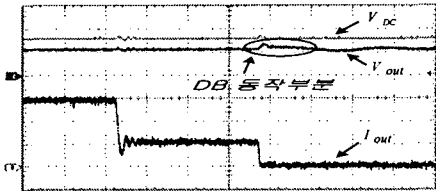


그림 3-16 출력전류변화시 V_{DC} , V_{out} , I_{out} 파형
(CH1: 100[A/Div], CH3: 250[V/Div],
CH4: 250[V/Div], TD: 200[msec])
Fig. 3-16 The V_{DC} , V_{out} , I_{out} waveform when the output current is changed

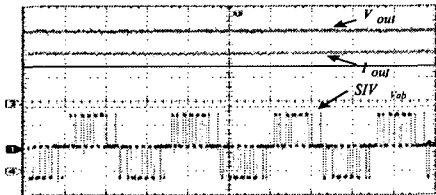


그림 3-17 Static inverter V_{ab} 상과 출력전압 및 출력전류
(CH1: 500[V/Div], CH3: 100[V/Div],
CH4: 20[A/Div], TD: 1[msec])
Fig. 3-17 Static inverter V_{ab} , output voltage, output current waveform

그림 2-2의 시스템 회로도에서 첫 부분에 있는 static inverter를 이용하여 chopper 앞단의 DC 400[V]를 유지하기 위해서 제어하게 된다. 그림 3-17의 1번 파형이 static inverter의 V_{ab} 상의 전

압파형이며 3번은 출력전압 파형이고 4번은 출력 전류의 파형을 나타내고 있다. 그림 3-18은 과부하시 보호 동작의 파형이다. 자기부상열차의 부상에 필요한 전원장치의 출력단 과부하전류가 (275[A]이상) 흘렀을 경우의 과부하 보호 동작을 나타내고 있다..

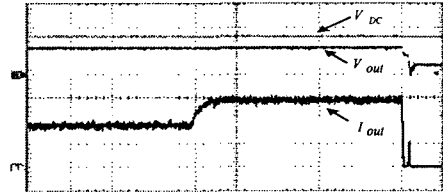


그림 3-18 과부하시 보호 동작
(CH1: 100[A/Div], CH3: 250[V/Div],
CH4: 250[V/Div], TD: 200[msec])
Fig. 3-18 The protection from overload

4. 결 론

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

- (1) 제시한 다중루프제어기는 부상시 급격한 전류 외란으로 인해 DC-DC컨버터 출력전압 sag 및 과전압현상에 대하여 제어특성을 향상시켰다.
- (2) 본 시스템에 적용한 DB는 자기부상열차의 이상(異狀) 제어에 의해 발생하는 작은 과전압에 의한 Fault 현상을 제거하여 시스템의 신뢰도를 향상시켰다.
- (3) Sub-chopper에 의해 발생하는 과도 과부하 전류로부터 시스템을 강인하도록 하기 위해서 전류 리미트 제어를 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. Liu and P. Sen, "A Novel Method to Achieve Zero-Voltage Regulation in Buck Converter", IEE E Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N o. 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.