

NBI용 필라멘트 전원공급 장치를 위한 풀-브리지 DC/DC 컨버터

(Full-Bridge DC/DC Converter for NBI Filament Power Supply)

전범수* · 이세형 · 이희준 · 신수철 · 이승교 · 원충연**

(Bum-Su Jun · Se-Hyung Lee · Hee-Jun Lee · Soo-Cheol Sin · Seung-Kyo Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract

FPS(Filament Power Supply), one of the KSTAR NBI(Neutral Beam Injections) is implemented by full-bridge DC/DC converter. NBI heating device for KSTAR(1.5MW) is developed for heating an ion source of plasma in KSTAR tokmak. The full-bridge DC/DC converter is applied to FPS for isolation with input and output. And FPS is operated with PWM control method which is the most usual method.

In this paper, NBI FPS of 4.8kW is simulated by using the PSIM 6.0. And the full-bridge DC/DC converter using IGBTs is fabricated to demonstrate it. The processor DSP 28335 is implemented for digital control.

Key Words : Full-Bridge DC/DC Converter, Filament Power Supply, NBI

1. 서 론

지금까지 원자력에너지는 핵분열 방식에 의존해 왔으며, 이때 발생하는 방사성 폐기물에 때문에 상용화가 어렵고, 방사선 오염에 대한 문제로 사고시 장기간 많은 피해를 입게 된다. 그러나 핵융합 발전은 수소와 같은 가벼운 원소의 핵이 결합시켜 무거운 원자핵을 만들기 때문에 안전성과 효율성을 만족시키고, 자원 고갈에 대한 문제가 없으며, 환경오염 물질을 배출되지 않아 무한 청정에너지원으로 주목받고 있다. 현재 국내 연구는 국가핵융합연구소에서 KSTAR 프로젝

트로 핵융합 방식의 연구를 진행하고 있으며, KSTAR 토카막 내의 플라즈마 전류를 유도하는 방법을 사용한다. 이러한 플라즈마 전류는 플라즈마 자체를 가열하고 구속력을 높이기 위하여 자기장을 발생하며, 토카막은 수백만 암페어의 전류를 유도하여 플라즈마를 가열하고 그 전류에 의한 자기장에 의해 플라즈마를 제어하게 되어 있다. KSTAR 중성입자빔 가열장치(NBI)는 1.5[MW]급의 수소 혹은 중수소의 중성입자빔을 KSTAR 토카막에 입하여 플라즈마 이온원을 가열하기 위해서 개발된다[1-2].

NBI는 최대 정격 120[kV], 70[A]이며 이온원으로부터 수소 혹은 중수소 이온빔을 인출 및 가속하는 전원장치부와 120[kV]고압에 떠 있는 이온원 플라즈마 발생 전원장치부로 구성된다. NBI 전원장치 시스템이 고전압, 대전류의 구성으로 되어 있기 때문에 안정성 검증이 우선적으로 되어야 한다. NBI 전원 시스템의

* 주저자 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과
** 교신저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
Tel : 031-290-7169, Fax : 031-299-4962
E-mail : solide7@naver.com
접수일자 : 2011년 3월 22일
1차심사 : 2011년 4월 1일
심사완료 : 2011년 6월 29일

특성을 분석하기 어려운 문제점을 가지고 있다.

NBI의 전원장치는 그림 1과 같이 구성되어 있으며, 현재 고전압부의 필라멘트 전원공급 장치에 대한 연구, 아크파워 전원공급기에 대한 연구를 중점적으로 진행하고 있다.

따라서 본 논문에서는 NBI전원장치중 하나인 필라멘트 전원공급장치의 에너지를 높이고 장시간 운전하면서 효율이 높은 전류구동 모드를 구현하여야 한다. 또한 시스템의 성능개선을 위하여 풀-브리지 DC/DC 컨버터 방식을 구현하였고, 실제 시스템과 동일한 용량으로 제작하여 성능개선을 검증하려 한다.

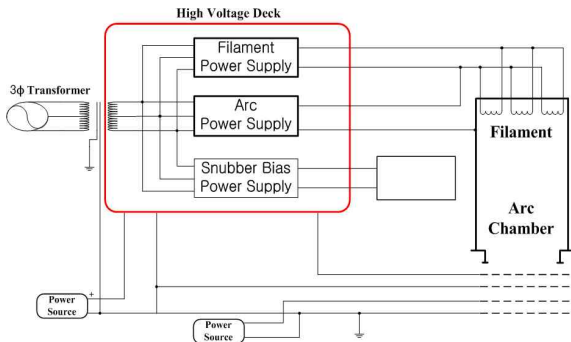


그림 1. NBI 전원장치 구성도
Fig. 1. NBI power supply diagram

2. 풀-브리지 DC/DC 컨버터 구성

그림 2은 필라멘트 전원공급 장치의 적용된 Full-Bridge DC/DC 컨버터 회로이다. 필라멘트 전원공급 장치는 3φ 200VAC[Peak]을 공급받아 최대 16[V], 300[A]를 정전압, 정전류 제어로 출력하고, AC를 DC로 정류하는 정류부, IGBT로 구성된 H-브릿지 인버터, 절연을 위한 고주파 변압기, 출력 정류를 위한 다이오드 및 LC 필터, 그리고 제어를 위한 DSP 및 전류, 전압센서로 구성된다.

풀-브리지 DC/DC 컨버터는 절연형으로 출력전압을 변압기의 설계에 따라 결정할 수 있는 장점이 있다. 그림 2와 같이 4개의 전력용 반도체 스위치를 사용하여 스위치 쌍 S_1-S_4 , 그리고 스위치 쌍 S_3-S_2 는 교번하여 턴-온 되므로 2차 측으로 에너지를 전달하게 된다.

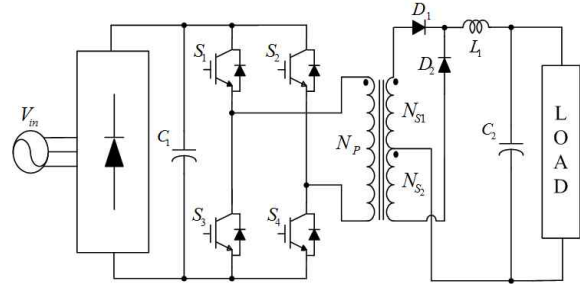


그림 2. 풀-브릿지 DC/DC 컨버터 회로
Fig. 2. The circuit of full-bridge DC/DC converter

그림 3은 연속모드 동작 상태에서의 정상 상태 파형과 컨버터 회로의 구간별 동작파형을 보여주고 있다.

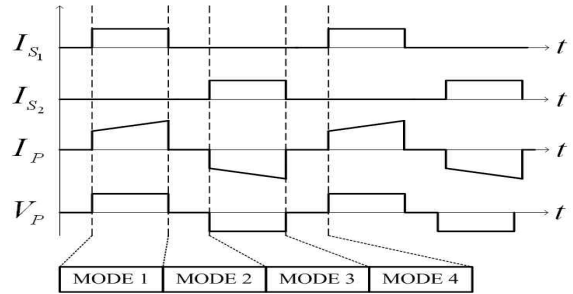


그림 3. 풀-브릿지 DC/DC 컨버터 동작파형
Fig. 3. Operational waveforms of full-bridge DC/DC converter

3. 풀-브리지 DC/DC 컨버터 동작원리

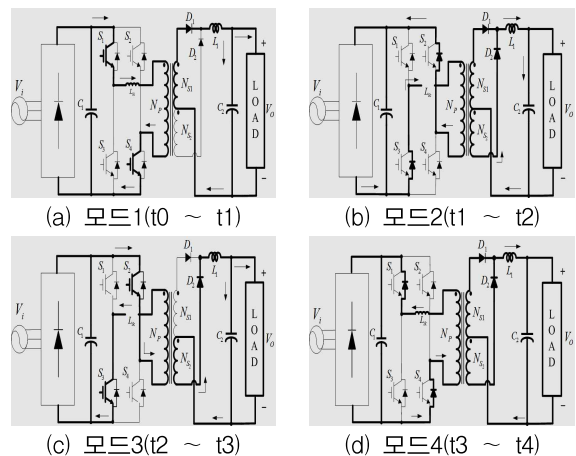


그림 4. 풀-브릿지 DC/DC 컨버터 동작모드
Fig. 4. Operation modes of full-bridge DC/DC converter

그림 4는 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 동작모드를 보여 준다. 4개의 모드로 구분되어 지고 동작 모드별 스위치의 상태 및 모드에 대한 설명 다음과 같다[3-5].

모드1

모드1 구간에는 1차측 에너지가 부하에 전달되는 모드로 스위치 S_1, S_4 가 턴-온 되어 그림 3 (a)와 같이 전류 흐름이 형성된다. 이 모드 동안 S_1, S_4 모두 턴-온 되므로 2차측 권선에 걸리는 전압은,

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_i \tag{1}$$

이 때 2차측 출력인덕터 L_1 에 걸리는 전압은,

$$V_{L_1} = \frac{N_s}{N_p} V_s - V_o \tag{2}$$

이 된다.

모드2

모드2 구간에는 스위치 S_1, S_4 가 턴-오프 되면서 1차측 전류는 스위치 S_2, S_3 의 내부 다이오드를 통하여 그림 3 (b)와 같이 전류 경로가 형성된다. 이때 다이오드 D_1, D_2 는 변압기의 자화 전류를 흐르게 하기 위하여 도통이 된다. 모드2의 i_{L_1} 의 전류 변화율은

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = -\frac{V_o}{L_1} \tag{3}$$

이 된다.

모드3

모드3 구간에는 1차측 에너지가 부하에 전달되는 모드로서 스위치 S_2, S_3 가 턴-온 된다. 이때 2차측 전류는 다이오드 D_2 를 통해 흐르며, 2차측 전압 및 출력인덕터 L_1 에 걸리는 전압은 모드1과 동일하게 된다.

모드4

모드4 구간에는 스위치 S_2, S_3 가 턴-오프 되고 1차

측 전류는 스위치 S_1, S_4 의 내부 다이오드를 통하여 그림 3 (d)와 같이 흐르게 된다. 또한 모드2와 같이 2차측 다이오드 D_1, D_2 가 도통되며, 모드4의 동작이 완료 되면 한주기 동안의 동작이 완료 된다.

4. 풀-브리지 DC/DC 컨버터 설계

4.1 고주파 변압기

고주파 변압기는 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 있어서 가장 핵심적인 부품으로서 시스템의 효율과 특성의 가장 큰 영향을 미친다. 고주파 변압기 설계 시 부하의 용량, 변동률, 주파수 등을 고려해서 설계하고, 코어의 재질 및 형상은 중량, 부피, 온도, 효율 등을 고려하여 선정해야 한다. 또한 높은 스위칭으로 인한 고주파로 영향으로 발생하는 변압기 표피효과 때문에 동손의 최소화를 위해 리츠와이어 및 Foil Conductor 등의 사용해야 한다[8-9].

4.1.1 권선수 결정

변압기에 사용되는 코어는 Ferrit 재질의 EE118을 사용하였고, ΔB 는 0.2[T]이고, 단면적 A_c 는 $1225 \times 10^{-6}[m^2]$ 이며, 변압기 1차측 권선은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} N_p &= \frac{V_{i(\min)} \times D_{\max} \times T_s}{2 \times \Delta B \times A_c} \tag{4} \\ &= \frac{288 \times 0.4 \times 5 \times 10^{-5}}{2 \times 0.2 \times 1225 \times 10^{-6}} \\ &= 11.75[Turn] \end{aligned}$$

또한 다이오드 전압강하 V_F 는 0.8[V]이며, 전류정격으로 인한 2개의 다이오드를 병렬로 사용해야 되어야 한다. 따라서 변압기 2차측 턴 수는

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{V_o + V_F + V_L}{2 \times D_{\max} \times V_{i(\min)}} \times N_p \tag{5} \\ &= \frac{16 + 0.8 \times 2 + 0.16}{2 \times 0.4 \times 288} \times 12 \\ &= 0.925 \end{aligned}$$

따라서 변압기 1차측 12[Turn], 2차측 1[Turn]으로

설계하였다.

4.2 주 스위치 선정

주 스위치의 선정은 스위치 양단의 전압과 도통 전류를 고려해서 선정한다.

4.2.1 스위치 양단 전압($V_{DS(max)}$)

스위치 양단(IGBT의 드레인과 소스) 전압은

$$V_{DS(max)} = V_{i(min)} = 288[V] \quad (6)$$

이고, 입력전압과 동일하다.

4.2.2 스위치 전류 ($I_{DS(max)}$)

스위치 전류는

$$\begin{aligned} I_{DS(max)} &= \frac{N_s}{N_p} \times (I_{o(max)} + I_{o(min)}) \quad (7) \\ &= \frac{1}{12} \times (300 + 30) \\ &= 27.5[A] \end{aligned}$$

이다.

주 스위칭 소자는 서지 전압을 고려하여 600[V] 내압의 소자를 선정하고, 전류는 출력 리플 및 과도상태의 오버슈트를 고려하여 50[A]급으로 선정한다. 본 논문에서는 세미크론사의 SKM50GB063D를 주 스위치로 사용하였다.

4.3 변압기 2차측 다이오드 정류기

다이오드 정류기의 선정은 역저지 전압과 다이오드에 흐르는 전류의 최대치, 역회복 특성 등을 고려하여 선정하여야 한다.

4.3.1 역저지 전압

역저지 전압은 다이오드의 전압정격을 나타내며, 그 전압은

$$\begin{aligned} V_R &= \frac{N_s}{N_p} \times 2 V_{i(max)} \quad (9) \\ &= \frac{2}{12} \times 2 \times 288 \\ &= 96[V] \end{aligned}$$

이 된다.

4.3.2 다이오드 전류의 최대치 $I_{F(max)}$

$$\begin{aligned} I_{F(max)} &= I_{out(max)} + I_{out(min)} \quad (10) \\ &= 300 + 30 = 330[A] \end{aligned}$$

여기서 역저지 전압, 다이오드 전류의 최대치, 순방향 도통 손실, 역회복 특성, 전압·전류의 여유를 고려하여 IXYS사의 Fast recovery epitaxial diode인 MEK350-02DA를 선정하였다. 이 다이오드는 병렬로 2개의 다이오드를 구성할 수 있어 2배의 전류 여유를 확보하였다.

4.4 출력 인덕터 L

4.4.1 인덕터 설계

$$\begin{aligned} L &\geq \frac{V_o \left(\frac{1}{2} - D \right) T_s}{2 I_{out(min)}} \quad (11) \\ &= \frac{16(0.5 - 0.4)}{20 \times 10^3} \\ &= 1.33[\mu H] \end{aligned}$$

4.4.2 인덕터 권선

인덕터 전류의 rms값 I_{Lrms} 는

$$I_{Lrms} \approx I_{omax} = 300[A] \quad (12)$$

허용 전류의 기준을 $300[A/mm^2]$ 로 고려하면 단면적은 $2.5[mm^2]$ 가 된다.

4.4.3 코어의 형상 및 재질

POSCO사의 무 방향성 전기강판 재질의 S-18을 사용하여 인덕터를 제작하였다.

표 1은 S-18의 규격 및 치수 허용오차 범위를 나타내고 있다.

표 1. S-18의 규격 및 치수 허용오차
Table 1. S-18 specification and dimensional tolerances

규격	두께 [mm]	밀도 [g/cm ³]	철 손w/kg [ω15/50]	자속밀도 T [B50]	점적율 [%]
50PN250	0.50	7.60	2.50 이하	1.62 이상	96.0 이상
50PN270		7.60	2.70 이하	1.62 이상	
50PN290		7.60	2.90 이하	1.62 이상	
50PN310		7.65	3.10 이하	1.62 이상	
50PN350		7.65	3.50 이하	1.62 이상	
50PN400		7.65	4.00 이하	1.63 이상	
50PN470		7.70	4.70 이하	1.64 이상	
50PN600		7.75	6.00 이하	1.66 이상	
50PN700		7.80	7.00 이하	1.70 이상	
50PN800		7.85	8.00 이하	1.70 이상	
50PN1000		7.85	10.00 이하	1.70 이상	
50PN1300		7.85	13.00 이하	1.70 이상	

폭 [mm]	두께 [mm]	두께공차 [mm]	폭방향 두께공차 [mm]	폭 공차 [mm]	직선도 (길이2[m] 기준)[mm]
1000 이하	0.35	±0.035	0.02 이하	+1.5	1.0 이하
	0.50	±0.040	0.03 이하	0	
	0.65	±0.052	0.04 이하		

4.4.4 권선수

결정된 코어의 Datasheet로부터 고려한 AL값을 넣으면

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL - value}} \tag{13}$$

$$= 2.5 [Turn]$$

으로 계산된다.

4.5 출력 캐패시터

커패시턴스 값은 신뢰성 관점에서 허용 전류와 ESR을 고려해야 한다.

출력 전압 리플 성분은

$$\Delta v_{out(s)} = \frac{\Delta v_{out}}{2\sqrt{3}} \tag{14}$$

$$= \frac{0.16}{2\sqrt{3}}$$

$$= 4.6 [V]$$

풀-브리지 컨버터의 출력 캐패시터 C_r의 흐르는 전류는 인덕터 전류의 리플 성분이 흐르므로 전류의 실효치는 다음과 같다.

$$I_{rms} = \frac{\Delta i}{2\sqrt{3}} = \frac{I_{omin}}{\sqrt{3}} \tag{15}$$

$$= \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32 [mA]$$

이 결과로부터 ESR을 구하면

$$ESR = \frac{\Delta v_{outs}}{I_{es}} \tag{16}$$

$$= \frac{4.6 [V]}{17.32 [mA]}$$

$$= 26.56 [\Omega]$$

위의 결과로부터 ESR을 고려하여 Hitachi사의 FXA시리즈 8200μF를 사용하였다.

5. 시뮬레이션

NBI용 FPS에 적용하기 위한 시스템의 성능 및 동작 특성을 확인하기 위하여 PSIM 6.0을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. NBI용 FPS의 특성상 정전압, 정전류 제어가 필요하며, 저전

압, 대전류의 특성으로 제어의 어려움이 발생한다. 따라서 전압 제어기 및 전류제어기를 PI로 구성하여 제어하였고 PWM을 이용한 1차측 스위치를 제어하므로써 구현하였다.

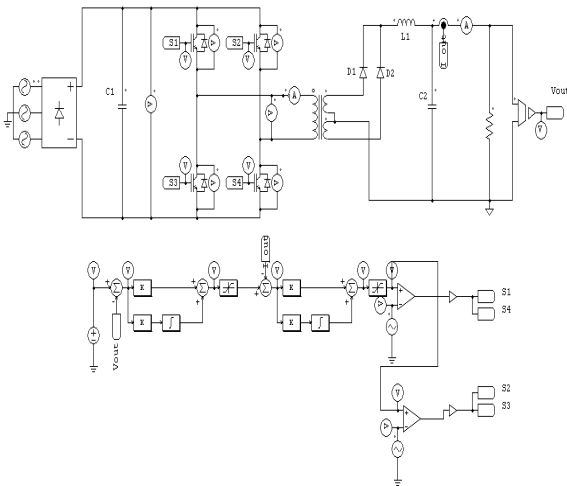


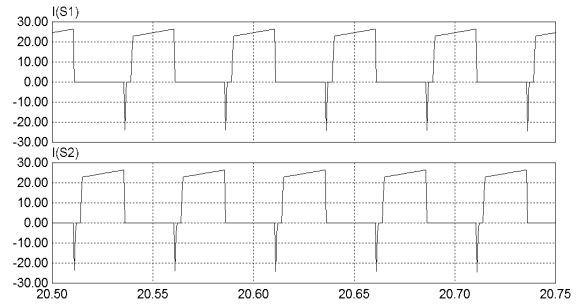
그림 5. 풀-브릿지 DC/DC 컨버터 시뮬레이션 회로
Fig. 5. Simulation circuit of full-bridge DC/DC converter

표 2는 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타내고 있으며, 실제 시스템에 적용된 파라미터와 동일하게 사용하였다.

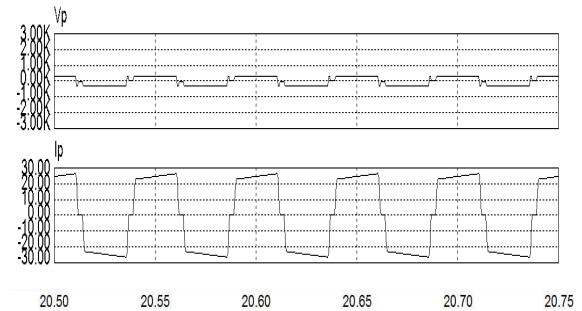
표 2. 시뮬레이션 파라미터.
Table 2. Simulation parameters

용량 [P]	4.8[kW]
입력전압 [V_i]	$3\phi 200[V_{Peak}]$
출력전압 [V_o]	16[V _{dc}]
출력전류 [I_o]	300[A]
권선비 [$N_p : N_{s1} : N_{s2}$]	12 : 1 : 1
스위칭 주파수 [f_s]	20[kHz]

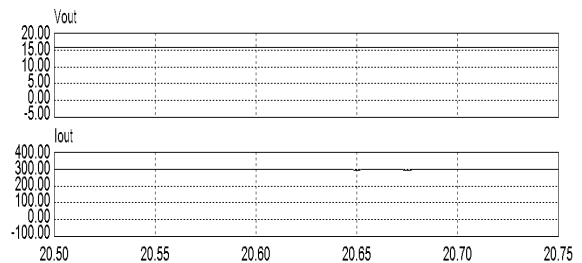
그림 6은 시뮬레이션 결과 파형을 보여준다. 그림 5 (a)는 게이트 파형을 나타내고 있으며, (b)와 (c)는 각각 변압기 1차측 전압과 전류, 출력전압과 전류 파형을 나타내고 있다. 출력전압과 전류의 파형을 보면 제어가 잘 수행되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 게이트 파형



(b) 변압기 1차측 전압과 전류 파형



(c) 출력전압과 전류 파형

그림 6. 시뮬레이션 결과파형

Fig. 6. Waveform of simulation results.

6. 실험 결과

본 논문에 적용한 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 실험 장치는 그림 7과 같다. 풀-브리지 DC/DC 컨버터의 시스템 구성은 3상 다이오드정류기, 고주파 변압기, 출력 반파 정류기, 출력 LC필터로 구성되어 있다. 시스템 제어를 위하여 TI사의 DSP28335를 이용하여 디지털 제어를 구현하였다. 실제 시스템과 동일한 용량 및 파라미터를 사용하였고 변압기 및 소자는 설계시

NBI용 필라멘트 전원공급 장치를 위한 풀-브리지 DC/DC 컨버터

사용된 소자와 용량을 사용하여 구성하였다. 부하는 낮은 전압 및 높은 전류가 흐르기 때문에 저항체를 이용한 수냉식 부하를 구성하였다.

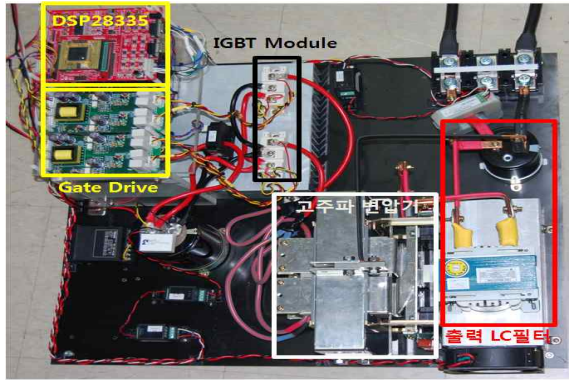


그림 7. 풀-브리지 DC/DC 컨버터 실험 세트
Fig. 7. Experimental set-up of full-bridge DC/DC converter

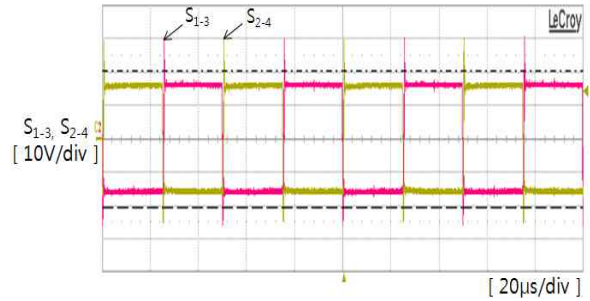
위 실험에 사용된 파라미터는 표 3과 같고, 설계에서 구한 값을 이용하여 선정하였다.

표 3. 시스템 파라미터
Table 3. System parameters

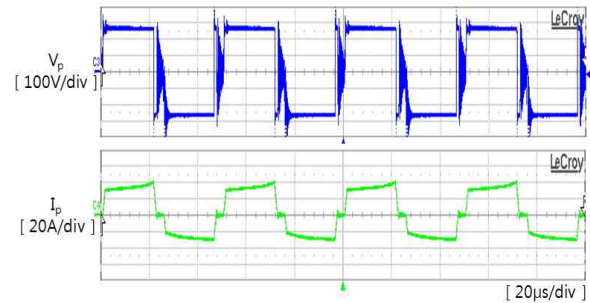
용량 [P]	4.8[kW]
입력 전압 [V_i]	3 ϕ 200[V_{Peak}]
출력 전압 [V_o]	16[V_{dc}]
출력 전류 [I_o]	300[A]
권선비 [$N_p : N_{s1} : N_{s2}$]	12 : 1 : 1
입력 커패시터 [C_1]	5600[μF]
필터 인덕터 [L_1]	10[μH]
필터 커패시터 [C_2]	8,200[μF]
스위칭 주파수 [f_s]	20[kHz]

그림 8은 시스템의 실험을 통하여 얻은 결과파형을 보여주고 있다. DC_link 전압은 약 280[V]가 인가되고 게이트 전압, 변압기 1차측 전압(V_{ab}), 전류(I_p), 출력 전압(V_o) 및 전류(I_o)의 파형이 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 NBI용 필라멘트 전원공급기의 실험에서 전부하시 전압과 전류가 안정적으로 제어가 되는 것을 확인할 수가 있었다. 하지만 1차

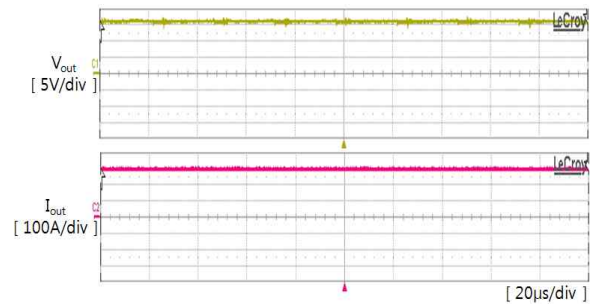
측 스위치의 on/off시 발생하는 손실을 볼 수가 있고 차후에 성능개선이 필요하기도 하다.



(a) 게이트 파형.



(b) 변압기 1차측 전압과 전류 파형



(c) 출력전압과 전류 파형

그림 8. 실험 결과 파형
Fig. 8. Waveforms of experimental results

7. 결론

본 논문에서는 FPS에 적용하기 위하여 풀-브리지 DC/DC 컨버터를 설계하였다. 기존 방식의 경우 대전류용 MOSFET를 수십개를 병렬로 연결하여 사용하였다. 하지만 소자의 개수와 높은 가격, 부품수급의 어

려움을 겪고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하고자 기존의 스위칭소자인 MOSFET 대신 IGBT 이용하여 사용이 가능하도록 컨버터를 구현하였다. KSTAR NBI용 Filament Power Supply의 특성을 고려하여 4.8[kW] Full-Bridge DC/DC 컨버터를 설계 및 제작하였다. 또한 실험을 통하여 DC 16[V]/300[A] 정전압/전류 출력 특성을 확인하였고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 Full-Bridge DC/DC 컨버터의 성능 및 안정성을 검증하였다.

본 논문에서는 NBI용 필라멘트 전원공급 장치에 적용이 가능한 풀-브리지 DC/DC 컨버터를 시뮬레이션과 실험을 통하여 성능을 개선하고 안정성을 검증하였다. 향후 NBI 시스템의 적용 가능성을 검토 중이다.

본 논문은 (주)다원시스템의 연구지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- [1] 3단계 보고서, 한국원자력연구원, “차세대 초전도 핵융합연구 장치 개발·운영사업”, 과학기술부 2007.
- [2] Y. S. Bae, “Tokamak plasma heating and electric current driving gear” The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, volume 11 unit1, pp. 38~44, 2009.
- [3] Pressman, Switching Power Supply Design, McGraw-Hill, 1997.
- [4] M. Bigi, L. Zanotto “Circuit Analyses of the Filament Ion Source Power Supplies for the ITER Neutral Beam Test Facility”, 2005.
- [5] S. J. Jeon “Zero-Voltage and Zero-Current Switching Full Bridge DC-DC Converter with Transformer Isolation,” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 16, No. 5, pp. 573~580, 2001.
- [6] Y. Y. Lee, Hongik University Master degree dissertation, 2001.
- [7] M. Bigi, L.Zanotto “Circuit Analyses of the Filament Ion Source Power Supplies for the ITER Neutral Beam Test Facility” 2005.
- [8] 김희준, “스위칭 전원의 기본 설계”, 성안당, 2002.
- [9] Mitra, A.K., Lu, J.J., TRUMF, Vancouver, BC “Filament power supply improvement of the TRUMF RF system”, Particle Accelerator Conference, 1993.
- [10] 임희성, 이세형, 전범수, 이승교, 원충연 “NBI용 필라멘트 전원공급장치를 위한 풀-브리지 DC/DC 컨버터”, 전력전자학회, 전력전자학술대회 논문집, pp. 485~486, 2010.

◆ 저자소개 ◆



전범수(田凡洙)

1977년 1월 11일생. 2002년 2월 순천향대학교 제어계측공학과 졸업. 2004년 2월 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정. 2006~2007년 (주)GS 퓨얼셀 연구원.



이세형(李世亨)

1981년 4월 30일생. 2007년 2월 전주대학교 공과대 전기전자공학과 졸업. 2011년 8월 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사졸업. 현재 (주)다원시스템 주임.



이희준(李羲俊)

1982년 9월 30일생. 2008년 2월 순천향대학교 정보통신공학부 졸업. 2010년 2월 성균관대학교 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



신수철(申守澈)

1977년 2월 27일생. 2004년 2월 수원대학교 전기전자공학부 졸업. 2006년 2월 성균관대학교 대학원 정보통신공학부 에너지시스템 졸업(석사). 현재 동대학원 전기전자컴퓨터공학과 박사과정. 2006~2010년 (주)효성중공업 선임연구원.



이승교(李承敎)

1976년 11월 19일생. 2002년 2월 동양대학교 제어계측공학과 졸업. 현재 성균관대학교 대학원 정보통신공학부 에너지시스템 석사과정. 2001년~현재 다원시스템 과장.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대학교 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년~현재 삼성전기 에너지파워 연구센터장. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.