

중성입자빔 가열을 위한 아크 전원 공급장치 설계 및 구현

(The Design and Implementation of Arc Power supply for Neutral Beam Injection)

이희준* · 신수철 · 이승교 · 정용채 · 원충연**

(Hee-Jun Lee · Soo-Cheol Shin · Seung-Gyo Lee · Yong-Chae Jung · Chung-Yuen Won)

Abstract

The Neutral Beam Injection(NBI) generates ultra-high temperature energy in the tokamak of nuclear fusion. The NBI consists of filament power supply acceleration and deceleration power supply and arc power supply(APS). The APS has characteristics of low voltage and high current. APS generate arc through constant output of voltage and current. So this paper proposed suitable buck converter for low voltage and high current. The case of proposed buck converter used parallel switch because it can increase capacity and decrease conduction loss. When an arc is generated, the NBI chamber occur high voltage. And it will break output capacitor of buck converter. Therefore the output capacitor was removed in the proposed converter. Thus buck converter with constant output is the most important design of the output inductor.

In this paper, designed APS verified operation of system and stability through simulation and prototype.

Key Words : Arc Power Supply(APS), Buck Converter, Neutral Beam Injections(NBI)

1. 서 론

현재 전력산업 분야는 산업화의 발전과 더불어 전력 수요의 갑작스러운 증가로 인하여 화력 발전과 원자력 발전에 의존해왔다[1].

화력발전은 환경오염 문제, 화석연료의 고갈 등 기존의 화석연료 에너지를 사용하여 생기는 문제가 크게 대두됨에 따라 원자력 발전에 의한 전력 의존성이 높아지고 있다. 하지만 최근 우라늄을 사용하는 원자력 발전소의 사고로 심각한 수준의 방사능 누출과 환경오염에 관한 관심이 증가함에 따라 사회적 문제가 되고 있다. 따라서 이러한 시점에 대체 에너지 개발이

* 주저자 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
** 교신저자 : 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 교수
* Main author : Doctor course of Electrical and engineering at sung kyunkwan Univ
** Corresponding author : Professor course of Electrical and engineering at sung kyunkwan Univ
Tel : 031-290-7169, Fax : 031-290- 4963
E-mail : jun9489@skku.edu
접수일자 : 2013년 2월 21일
1차심사 : 2013년 3월 1일
심사완료 : 2013년 4월 23일

시급하다[2].

핵을 이용한 발전은 핵 분열 방식(원자력 발전)과 핵 융합 방식(핵 융합 발전)으로 나뉜다. 원자력 발전의 경우 핵 분열으로 인한 핵 폐기물의 처리 문제와 방사능 누출이 큰 문제로 나타나고 있다. 하지만 핵 융합 발전의 경우 사고시 연료 공급이 중단되면 1~2초 내에 바로 운전이 자동 정지되므로 안전성도 높으며, 사고시 방사능 누출 등의 위험이 핵 분열 방식보다 낮다. 또한 핵 폐기물이 발생하지 않는다. 핵 융합 발전의 주 연료는 중수소와 삼중수소의 융합에 의해 열이 발생된다. 중수소는 바닷물 1리터당 0.03그램이 존재하여 이 양만 가지고도 300리터의 휘발유와 동일한 에너지를 사용할 수 있다[3].

핵 융합 발전은 핵융합에서 발생하는 운동에너지가 열에너지로 변환되어 터빈을 전기적·기계적으로 가동 시키는 발전이다. 초고온 플라즈마 상태에서 중수소와 삼중수소가 서로 융합할 경우 질량 감소가 진행되고, 이에 초고온 핵융합 에너지가 방출된다. 이러한 에너지를 얻기 위하여 많은 전원 공급장치가 필요하게 되며, 그 중 중성입자빔 가열장치(NBI : Neutral Beam Injection)는 토카막 장치에서 초고온 에너지를 얻기 위하여 가장 널리 이용되고 있다. 기존 시스템에서는 중성 입자빔 장치에 사용된 전력변환장치의 경우 위상제어 정류기와 변압기로 단일 시스템 구성으로 개발이 되었다. 하지만 단일로 구성된 시스템의 경우 정밀한 제어의 어려움과 동시에 개발의 기초단계로써 개선 방안이 제시되었다. 또한 위상제어 정류기의 경우 스위치 턴 온와 오프시 제어기술의 어려움과 복잡함을 가지고 있으며, 역률제어, 출력전압 강하, 전고조파왜율 등으로 출력 전압 변동에 미치는 영향이 크다. 따라서 시스템의 신뢰성, 안정성을 고려하여 단일 시스템보다는 복합된 시스템의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 중성입자빔 가열장치의 구성은 중성 입자빔을 생성하기 위한 필라멘트 전원 공급 장치, 중성 입자빔을 발생시키는 아크 전원 공급 장치, 중성 입자빔을 유지하기 위한 감가속 전원 공급장치가 필요하다[4-8].

중성 입자빔 가열 장치중에서 아크빔을 발생시키는 아크 전원 공급장치를 연구하였다. 아크 전원 공급장

치는 저전압, 대전류의 특성을 가지고 있기 때문에 이를 고려하여 전력 변환기가 설계되어야 한다. 또한 시스템 안정성이 보장되어야지만 아크 전원 공급장치로 사용할 수 있다. 이러한 낮은 출력전압과, 대전류를 분배하여 시스템을 안정화하는 제안된 병렬 벡 컨버터가 적당하다. 2절에서는 아크 전원 공급 장치의 동작 및 시스템 특징을 설명하고, 3절에서는 아크 부하에 특징에 따라 출력 커패시터가 제거가 된다. 따라서 출력 커패시터가 없으므로 출력전압의 리플 크게 발생한다. 큰 리플은 일정한 아크 발생에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 출력 인덕터의 설계가 매우 중요하다. 4절에서는 아크 발생하기 위한 NBI 제어에 대하여 설명하고 마지막으로 시스템의 안정화를 위하여 2.4kW로 시스템을 검증 후 288kW급 아크 전원 공급장치에 적용하였다. 또한 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 안전성과 신뢰성의 타당성을 입증하였다.

2. 시스템의 구성

그림 1은 중성 입자 빔 장치 중 아크 전원 공급장치를 나타내고 있다. 구성은 크게 정류부, 필터부, 병렬 벡 컨버터부로 이루어진다. 교류 전원 200V를 인입 받아 Surge Suppressor를 거쳐 3상 전파 브리지 정류를 하여 직류 전원을 얻는다. 입력 및 정류부는 초기 기동시의 전류를 억제하고, DC_Link의 과전압을 방지하기 위하여 Pre-Charge회로를 갖는다. 제안된 벡 컨버터는 정류부에 의해 얻어진 직류 출력을 NBI 챔버 안에서 아크빔을 발생하기 위하여 운전에 적합한 전압/전류로 제어한다. 아크 전원 공급장치의 기본적인 출력 제어 운전은 병렬 벡 컨버터에서 이루어진다. 아크 전원 장치의 출력 제어는 정전압, 정전류로 제어하기 위하여 전압제어기와 전류제어기를 직렬구조의 제어로 수행하였다. 제안된 벡 컨버터는 기본적으로 대용량 6 병렬 IGBT와 Chopping 인덕터로 구성된다. 병렬 운전은 용량의 확대뿐만 아니라 대전류의 도통 손실을 줄이기 위해서는 병렬 구성이 유리하다[9]. 또한 제안된 벡 컨버터에서 정상상태로 동작 중에 갑자기 부하가 단락되면 벡 컨버터를 구성하는 주요 소자인 커패시터가 영구 제거가 된다. 이에 따라 단락전류를

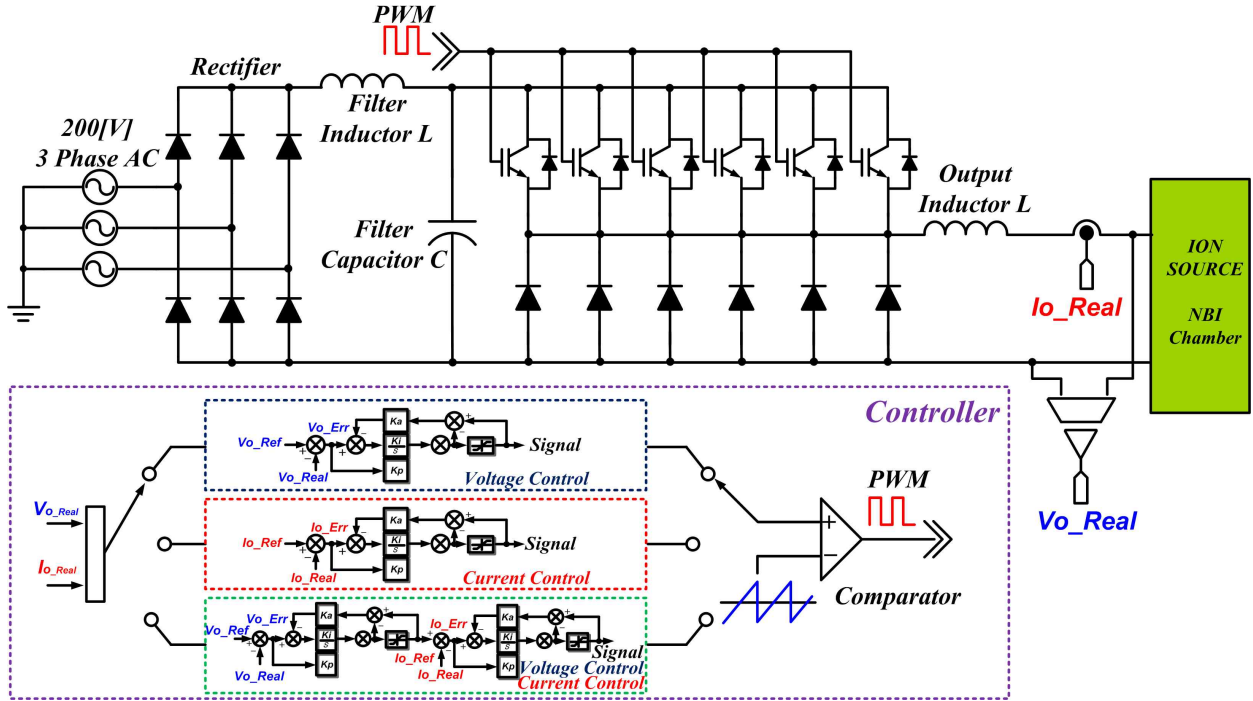


그림 1. 제안된 아크 전원 공급 장치의 회로도
 Fig. 1. The proposed schematic of arc power supply

보호하는 회로를 추가하여 장치를 보호하게 된다. 하지만 보호회로가 이상 동작시 이를 보호하기 위하여 벽 컨버터의 커패시터를 제거하였다. 이에 따라 전류와 전압리플이 커지기 때문에 제어 기술이 필요하다. 이와 같이 제안된 아크 전원은 기본적인 특성이 전류원이다. 커패시터를 갖는 전압형 컨버터의 경우 커패시터의 내부 임피던스가 낮아 IGBT의 병렬 운전시 각 스위치의 ON / OFF 시간차이에 따라 일시적으로 일부 스위치에 과전류를 도통시킬수 있는 단점을 갖는다. 하지만 전류형 컨버터는 내부 임피던스가 큰 인덕터를 갖는다. 이는 스위치가 ON / OFF 시점에서 과도한 전류의 흐름을 제한하기 때문에 IGBT의 병렬운전시 전압형 컨버터가 갖는 단점을 보완할 수 있다 [10-11].

3. 아크 전원 공급장치 인덕터 설계

전원 공급장치는 저전압 대전류의 특성에 따라 스

위치 병렬 구조로 사용하였다. 병렬 구조의 장점으로 스위치와 다이오드의 정격을 감소시킨다[12]. 아크 부하 특성에 따라 벽 컨버터의 출력 커패시터 제거하였다. 그러므로 출력 전압 및 전류는 리플이 커지게 된다. 큰 리플은 일정한 시간 동안 아크빔을 출력하지 못하게 한다. 또한 아크빔이 발생시 리플의 영향으로 일정한 방향이 아닌 다른 방향으로 작은 아크빔의 발생하여 다른 전원 공급장치에도 영향을 줄 수가 있다.

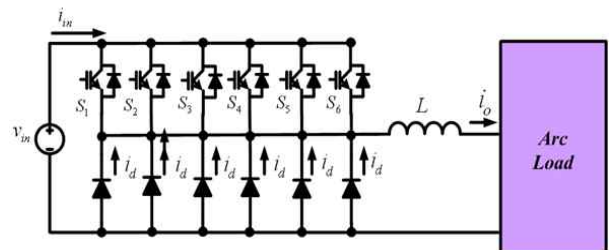


그림 2. 제안된 벽 컨버터의 간략화
 Fig. 2. The simplified buck converter circuit

따라서 일정한 출력을 갖기 위해서는 출력 인덕터의 설계가 중요하다. 아크 전원장치의 벅 컨버터 설계 조건은 정격 부하 10%이상의 부하에 대하여 연속 모드로 벅 컨버터를 운전하여야 한다. 또한 정전류 제어시 전류 리플이 2% 이내로 만족하도록 설계하여야 한다.

그림 2는 병렬 벅 컨버터를 설계하기 위하여 정상 상태에서 등가회로를 나타낸 것이다. 제안된 병렬 벅 컨버터에서는 출력단의 커패시터가 없기 때문에 RL 1차 회로의 등가회로로 나타낼 수 있다. 회로에 흐르는 전류는 정상상태에서 스위치 상태에 따라 전류는 I_{omin} 과 I_{omax} 로 리플의 크기를 정의할 수 있다. 이때 $I_{omin}=39.6A$, $I_{omax}=40.4A$ 의 전류 크기를 나타낸다. 또한 스위치의 시비율로 스위치의 온 오프시간을 나타낸다. tm위치 주기 T_s 는 100 μs 로 정하였다. 초기 상태는 다음과 같다.

Switch turn off initial state

$$t = DT_s, \quad i(0) = I_{omin} \quad (1)$$

Switch turn on initial state

$$t = (1-D)T_s, \quad i(0) = I_{omax} \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용하여 스위치가 턴 온 시와 오프시 출력 전류의 초기값을 대입하여 계산하면 다음과 같이 나타낸다.

$$i_{ON-L}(t) = \frac{V_{in}}{R} + e^{-\frac{t}{\tau}} \left(I_{omin} - \frac{V_{in}}{R} \right) \quad (3)$$

$$i_{OFF-L}(t) = I_{omax} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

그림 3은 벅 컨버터 출력 전압 및 전류의 정상상태 응답을 나타내고 있으며, 시비율에 따른 스위치 온 시간과 오프 시간에 대하여 정의 하였다.

식 (3), (4)를 이용하여 스위치의 턴 온 시와 오프 시에 인덕터 값은 다음과 같이 나타낸다.

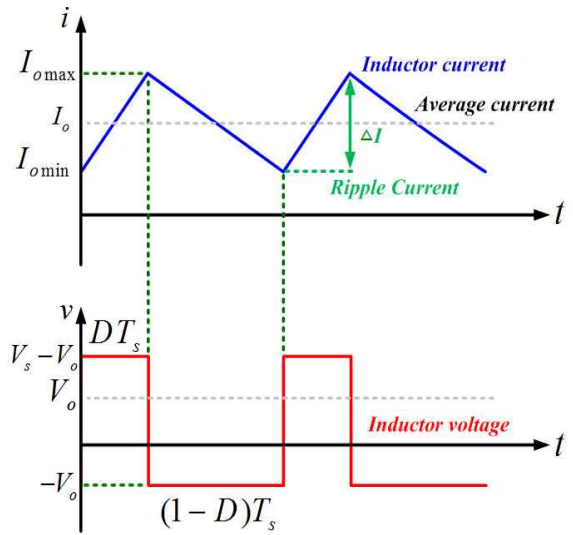


그림 3. 벅 컨버터 출력 전압, 전류의 정상상태 응답
Fig. 3. The steady state response of the output current and voltage of buck converter

Switch turn on

$$L = \frac{RDT_s}{-\ln K_1} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{V_o}{I_o} G_{vmin} \\ &= \frac{V_o \cdot G_{vmin}}{(-\ln K_1) \cdot f_{sw} \cdot I_o} \end{aligned}$$

Switch turn off

$$L = \frac{R(1-D)T_s}{-\ln K_2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{V_o}{I_o} (1 - G_{vmin}) \\ &= \frac{V_o \cdot (1 - G_{vmin})}{(-\ln K_2) \cdot f_{sw} \cdot I_o} \end{aligned}$$

스위치 턴 온 시와 오프시 인덕터 L값을 유도하기 위하여 식 (3)과 (4)를 이용하여, K_1 과 K_2 를 구할 수

있다. K_1 과 K_2 의 경우 정상상태에서 스위치 턴 오프 시 정해진 전류 리플값과 벡 컨버터의 입력전압의 변동률값을 포함하고 있다.

$$K_1 = \frac{1 + \frac{r}{2} - \frac{1}{G_{vmin}}}{1 - \frac{r}{2} - \frac{1}{G_{vmin}}} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{1 - \frac{r}{2}}{1 + \frac{r}{2}} \quad (8)$$

current Ripple Ratio : $r \equiv \frac{\Delta I}{I_o}$

Minimum Voltage Gain(G_{vmin}): $\frac{V_o}{V_{inmin}}$

K_1 과 K_2 의 경우 정상상태에서 벡 컨버터의 동작에 따라 값이 바뀌게 된다. 또한 전류리플과 입력전압 출력 전압의 관계에 따라 값이 변경될 수 있다. 식 (5)와 (6)을 통하여 2개의 인덕터 값을 계산하게 되면 2개의 인덕터값은 6mH로 동일하다. 하지만 0.4mH의 마진을 고려하여 6.4mH로 사용하였다. 시스템 운전시 정상상태에서의 인덕터 값은 DC-Bias 특성상 인덕턴스의 값이 떨어지게 된다. 따라서 정상상태에서는 리플이 크게 발생할 수 있다. 이를 고려하여 실제 제작시 0.4mH의 마진을 고려하였다.

4. 병렬 스위치 동기 운전

제안된 병렬 벡 컨버터의 경우 스위치와 다이오드를 6개의 병렬로 연결하여 전류를 분배하여 사용하였다.

보통 전류 병렬 제어시 MOSFET 소자를 사용하여 구성한다. MOSFET의 경우 전류가 불평형으로 발생시 한쪽으로 전류가 흐르는 스위치의 기생 저항값이 커지게 되어 전류가 적게 흐른다. 그러므로 다른 스위치에 더 많은 전류가 흐르게 된다. 외부 회로가 필요 없이 전류가 평형을 이루게 된다. 하지만 본 논문에서의 대전류 구동시 MOSFET은 더 많은 소자를 사용하

여 비용 및 부피가 커지는 단점이 있다. 하지만 IGBT의 경우 스위치의 턴온, 오프의 스위칭시에도 온도특성에 의해 스위칭 속도가 변화하여 달라지므로 과도적인 전류 불평형이 생긴다. 이런 점을 해결하기 위해서는 온도에 따라 각 스위치에 다른 냉각법을 사용하여야 한다. 하지만 냉각법의 경우 각 스위치마다 온도를 센싱하여 냉각을 하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 주회로와 드라이브 회로 배선이 중요하다. 주회로에서는 스위칭시에 있어서 전류 불평형은 소자 외부의 인덕턴스나 임피던스에 지배되고 있으므로, 주회로 설계시 대칭 배선을 실시하였다. 드라이브 회로 배선에서는 드라이브 회로와 각 병렬 소자간 배선의 차에 의해 드라이브 속도가 달라진다. 따라서 과도 영역에서 전류 언밸런스를 가져온다. 따라서 게이트 저항을 스위치에 최대한 가까이 연결하고 게이트 신호의 배선을 동일하게 하는 PCB를 설계하여 IGBT의 병렬접속 동작을 안정화하였다.

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서는 제안된 벡 컨버터를 이용하여 시스템을 구성하였다. 이에 따라 전체적인 제어특성을 알아보기 위해서 Powersim을 이용하여 블록도와 DLL을 구성하였다. DLL은 정전압, 정전류를 제어하기 위하여 전압제어기 및 전류 제어기로 구성하였다. 제어기의 구성은 Anti wind-up PI 제어기를 사용하여 구성하였으며, 전압제어 주기는 1ms, 전류 제어기 주기는 100µs로 제어하였다.

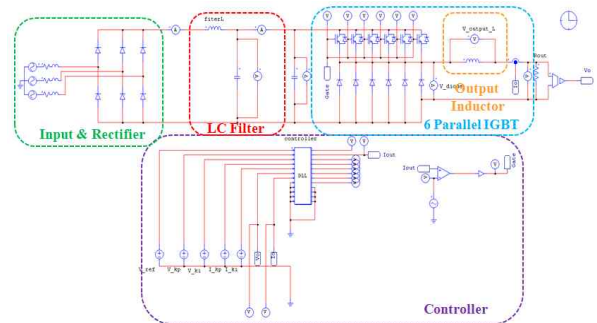


그림 4. 아크 전원 공급 장치 시뮬레이션
Fig. 4. The arc power supply simulation

그림 4는 시스템의 설계조건에 따라 2.4kW 아크 전원 공급 장치 시뮬레이션을 구성하였다. 또한 표 1은 2.4kW 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

파라미터 중에서 입력전압을 3상 200V를 사용하였다. 3상 200V의 사용은 시스템의 구성상 다이오드 정류기를 통하여 직류 링크의 293V로 나타나게 된다. 293V의 전압을 다시 강압하여 벅 컨버터 출력에 사용된다. 이때 직류 링크의 전압이 과도하게 크게 되면 스위치의 시비율이 낮게 되어 컨버터의 효율이 떨어지게 된다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameter

파라미터	값	단위
입력전압(AC)	3상 200	V
출력전압(DC)	60	V
출력 전류(DC)	40	A
스위칭 주파수	10	kHz
입력 인덕터	50	μ H
입력 커패시터	6800	μ F
출력 인덕터	6.4	mH
리플	2	%

그림 5는 동기화된 스위치 게이트 신호를 나타낸다. 병렬로 연결된 IGBT가 동시에 제어가 이뤄지지 않으면, 스위칭 신호가 늦은 IGBT에 과전류가 흘러 과파가 될 수 있다. 그림 6은 동특성을 보기 위하여 제안된 컨버터의 출력전압 및 전류를 나타내고 있다. 오버슈트 없이 출력 전압 및 전류가 일정하게 나타내고 있다.

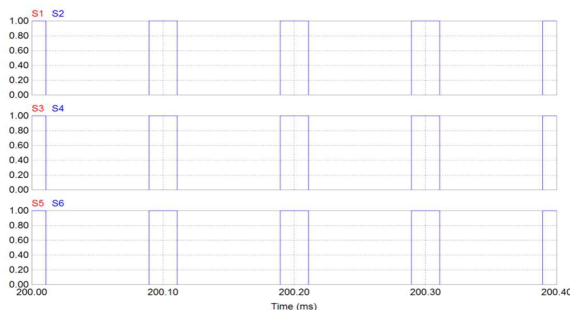


그림 5. 동기화된 스위치 게이트 신호
Fig. 5. PWM waveforms of parallel buck converter

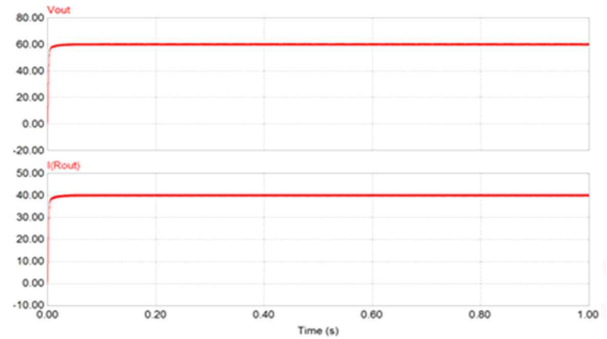


그림 6. 제안된 벅 컨버터 출력 전압 및 전류
Fig. 6. The proposed buck converter output voltage and current

그림 7은 실험으로 검증하기 위하여 프로토타입 2.4kW급 아크 전원 공급 장치를 보여준다.

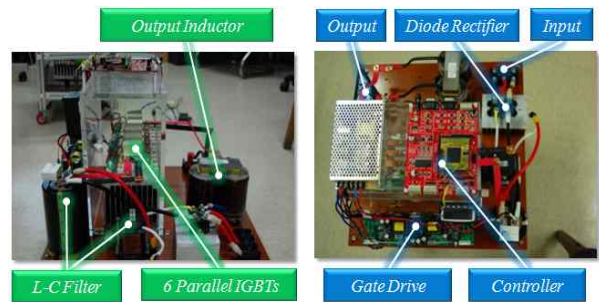


그림 7. 2.4kW 아크 전원 공급 장치
Fig. 7. 2.4kW Arc power supply

프로세서는 TMS320F28335를 사용하였다. 또한 Gate drive는 노이즈를 차단하기 위하여 절연된 Opto Isolation을 이용하여 구성하였다.

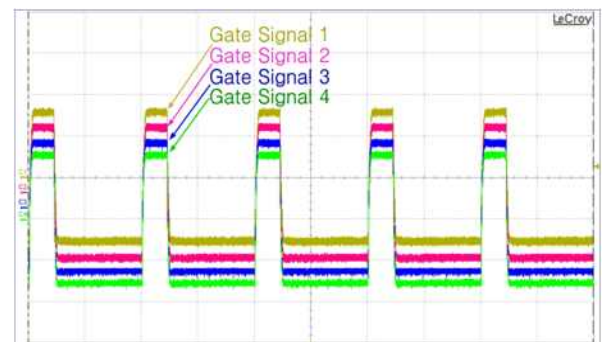


그림 8. 병렬 벅 컨버터 스위치 게이트 신호
Fig. 8. PWM waveforms of parallel buck converter

그림 8은 벡 컨버터의 스위치 게이트 신호를 나타낸다. 게이트 신호가 동기화가 되지 않으면, 전류의 불균형으로 소자에 물리적 손상이 가해진다. 이런 부분을 보완하기 위하여 게이트 드라이브에서 나오는 신호의 패턴을 일정하게 설계 제작하였고, 게이트 저항을 최대한 스위치에 가깝게 함으로써 동기화를 유지하였다.

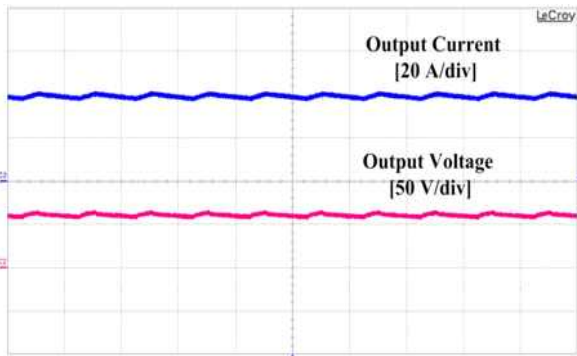


그림 9. 벡 컨버터 출력 전압 및 전류
Fig. 9. The buck converter output voltage and current

그림 9는 프로토타입으로 제작된 벡 컨버터의 출력 전압과 전류를 나타낸다. 부하는 저항 부하를 사용하였으며 1.5Ω으로 적용하였다.

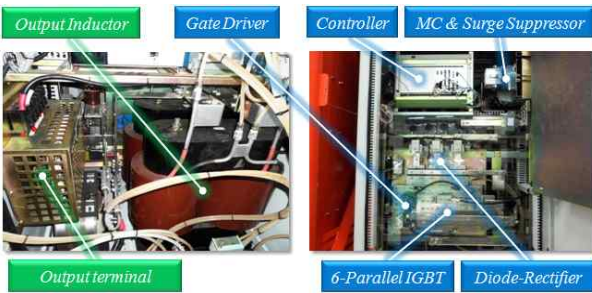


그림 10. 288kW 아크 전원 공급장치
Fig. 10. 288kW arc power supply

그림 10은 288kW 아크 전원 공급장치의 시스템을 나타내고 있다. 실제 아크 시스템에서는 160V/1,800A의 정격을 나타내고 있다. 288kW에서 사용된 게이트 드라이브 및 게이트 배선 PCB는 2.4kW 타입과 동일한 장치로 구성되어 있다.

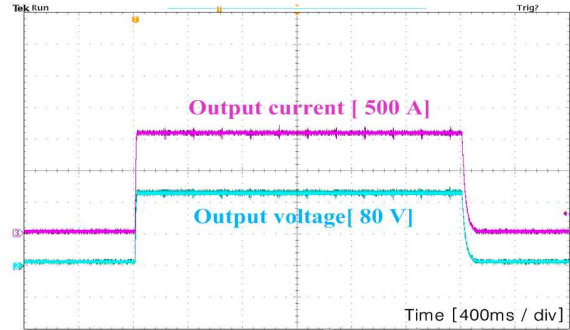


그림 11. 일정 부하 인가시 출력 전압 및 전류
Fig. 11. The output voltage and current of constant load

그림 11은 아크 전원 공급장치의 출력 특성을 확인하기 위하여 수 부하를 이용한 아크 전원 공급장치의 출력전압과 전류를 확인하였다. 이를 통하여 출력이 일정하게 출력됨을 확인하였다. 아크 전원 공급장치에서 발생된 아크 빔은 초고온 플라즈마 상태를 만들어주는 역할을 한다.

그림 12는 아크 전원 공급장치의 펄스 지령에 따른 출력전압과 전류를 나타낸다. 아크 전원 공급장치의 전류가 허용한도 이상이며, 아크빔 인출을 중지하고 일정 시간 이후 다시 가동하여 빔 인출을 일정하게 유지한다. 따라서 아크 빔 발생 후 일정한 아크빔을 유지하기 위하여 아크 전원 공급장치의 출력을 펄스출력으로 인가한다.

이때 펄스형태의 출력은 오버슈트가 발생하면 안된다. 오버슈트로 인하여 아크빔의 출력이 제어가 불가능해진다.

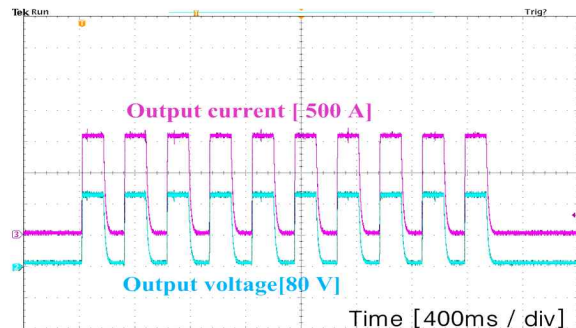


그림 12. 펄스 출력의 전압과 전류
Fig. 12. The voltage and current of pulse output

시 초고온의 플라즈마를 유지시키는 역할을 하게 된다. 또한 초고온 플라즈마에서 발생된 열에너지는 터빈의 기계에너지를 다시 전기에너지로 바꾸어 발전하게 된다.

6. 결 론

본 논문에서는 중성 입자빔용 아크 전원 공급 장치 시스템의 특징인 대전류, 저전압의 동작에 적합한 컨버터를 제안하였다. 제안된 병렬 벡 컨버터의 경우 각 스위치의 동작 특성에 따른 IGBT의 병렬 운전 문제점과 아크 부하에 적합한 시스템으로 구성하였다. 또한 병렬 벡 컨버터의 출력 커패시터를 제거하여 출력측에 발생된 리플을 없애기 위하여 시스템에 적합한 인덕터를 설계하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션과 프로토타입으로 구성하여 시스템의 동작을 확인하였다. 중성 입자 빔 가열 장치 중 필라멘트 전원 공급장치와 아크 전원 공급장치를 이용하여 NBI 챔버에 아크빔을 발생하였으며, 향후 효율 증가와 시스템의 부피 감소에 대한 연구를 진행할 계획이다.

그림 13. 필라멘트 전원 공급 장치와 아크 전원 공급 장치의 출력 전압 및 전류
Fig. 13. The Output voltage and current of filament power supply and arc power supply

그림 13은 중성 입자빔 가열 장치에서 아크빔을 발생하기 위한 아크 전원 공급 장치, 아크빔을 발생하기 위하여 초기 가열을 위하여 필라멘트 전원 공급장치의 출력을 나타내고 있다. 중성 입자 빔 장치에서 필라멘트 공급장치의 사양은 최대 16V, 300A로 구성된다. 또한 필라멘트 공급장치의 구성은 12개의 개별 장치로 독립 및 병렬 운전할 수 있도록 전환이 가능하다.

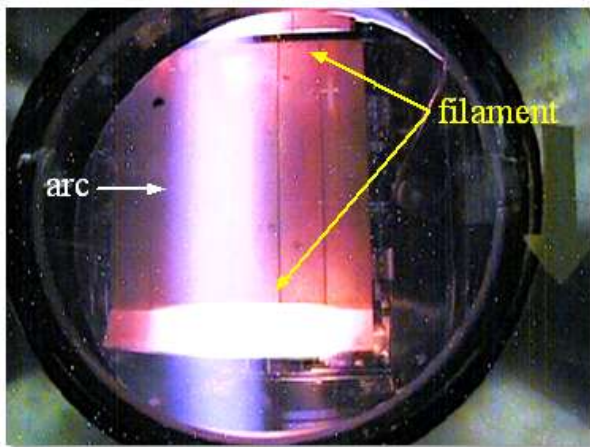


그림 14. 중성 입자빔 챔버로부터 발생된 아크
Fig. 14. The NBI Chamber during arc power supply operation

그림 14는 중성 입자빔 챔버에 발생된 아크빔을 나타내고 있다. 아크 전원 공급 장치로부터 발생된 아크빔은 중성 입자빔 시스템의 출력으로써 핵융합 발전

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(20124010203300)

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다.(2011-0015584).

References

- [1] Korea Atomic Energy Research Institute, "Korea Superconducting Tokamak Advanced Research Project", Ministry of Science and Technology 2007.
- [2] Bea Young Sun, "Plasma Heating and Current Drive Technology", March. 2008.
- [3] Kim Woong Chae, "Status of KSTAR operating with the prospect of fusion power generation", Journal of the Electrical World No 383, pp 27~30, 11 2008.
- [4] B. S. Jun, S. H. Lee, H. J. Lee, S. C. Shin, S. K. Lee, C. Y. Won, "Full-Bridge DC/DC Converter for NBI Filament Power Supply", Journal of KIIE, vol.25, NO. 7, pp32~39, July 2011.
- [5] D. H. Chang, B. H. Oh, "Development and testing of a

prototype Long Pulse Ion Source for the KSTAR Neutral Beam System”, Journal of the Korean Nuclear Society, vol. 36, Num 4, pp 357~363, Aug 2004.

[6] D. H. Chang, S. H. Jeong, B. H. Oh, K. W. Lee, C. S. Seo, “Arc discharge efficiency of a multi megawatt long pulse ion source for the KSTAR neutral beam injector”, Plasma sources Sci. Technol, 14 pp 36-341, 2005.

[7] 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.

[8] M. Bigi, L.Zanotto “Circuit Analyses of the Filament Ion Source Power Supplies for the ITER Neutral Beam Test Facility” 2005.

[9] Zhihua Yang, Sheng Ye, Yan-Fei Liu, “A New Resonant Gate Drive Circuit for Synchronous Buck Converter”, IEEE Trans, Vol. 22, No. 4, pp. 1311~1320, 2007.

[10] Jiann-Fch Chen, Jiinn-Nan Lin, Tsu-Hsu-Hua-Hua Ai, “The techniques of the serial and paralleled IGBTs”, IECON, vol. 2. pp. 999~1004, Aug 1996.

[11] Jiann-Fch Chen, Jiinn-Nan Lin, Tsu-Hsu-Hua-Hua Ai, “The techniques of the serial and paralleled IGBTs”, IECON, vol. 2. pp. 999~1004, Aug 1996.

[12] Soo-Seok Kim, “The Analysis of Parallel Operating Characteristics for DC-DC Converter Using the Parallel Operation Model”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol, 18, No 5, pp. 174~182, September 2004.

◇ 저자소개 ◇



이희준 (李羲俊)
1982년 9월 30일생. 2008년 순천향대 정보통신공학부 졸업. 2011년 성균관대학교 대학원 메카트로닉스 협동과정 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정.



신수철 (申守澈)
1977년 2월 27일생. 2004년 수원대 전기전자공학부 졸업. 2006년 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 2006년~2010년 (주)효성 중공업연구소 선임연구원. 2010년~현재 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 박사과정.



이승교 (李承敎)
1976년 11월 19일생. 2002년 동양대학교 제어계측공학과 졸업. 2009년~현재 성균관대학교 대학원 정보통신공학부 에너지시스템 석사과정. 2001년~현재 다윈시스템 사장.



정용재 (鄭龍采)
1966년 2월 28일생. 1989년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1995~1999년 LG 전자 홈어플라이언스 연구소 선임연구원. 1999년~

현재 남서울대학교 전자공학과 교수. 전력전자학회 편집부위원장.



원충연 (元忠淵)
1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006~2009년 한국전력공사 PQ 심사위원. 2006~2009년 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술 평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010년~현재 도시철도공사 기술검증위원. 2007~2012년 삼성전기 에너지파워 연구 센터장. 2011년~현재 한국토지주택공사 기술심사 평가위원. 2010년 전력전자학회 회장. 현재 성균관대 정보통신대학 전자전기공학부 교수.