

288kW급 중성 입자 빔용 Arc Power Supply 설계

이승교*, 이희준*, 신수철*, 원충연*, 이택기**, 박선순***
 성균관대학교*, 남서울대학교**, 다윈시스**

The Design of the 288kW ARC power supply for NBI

Seung kyo Lee*, Hee Jun Lee*, Su Chul Shin*, Chung Yuen Won*, Taeck kie Lee**, Sun Soon Park
 Sungkyunkwan University*, Hankyog National University**, Dawonsys***

ABSTRACT

본 논문에서는 중성 입자 빔 장치용 아크 전원장치를 제안하였다. 제안된 아크 전원장치는 저전압, 대전류의 특성을 가지고 있기 때문에 이를 고려하여 전력변환기가 설계되어야 하고, 시스템이 안정성이 보장되어야지만 사용할 수 있다. 따라서 본 시스템에서는 288kW급 아크 전원장치를 설계하고 실험을 통하여 검증하였다.

1. 서론

최근 우리나라를 사용하는 원자력 발전의 사고로 심각한 수준에 방사능과 환경오염이 문제되고 있다. 이러한 시점에 대체 에너지 개발이 시급하다.

본 논문에서는 원자핵분열을 이용한 핵융합 발전에 사용된 중성 입자 빔(Neutral Beam Injection : NBI) 장치 중 아크전원 공급장치(Arc Power Supply: APS)의 전력변환 장치를 제안하였다.[1] NBI장치는 토카막에서 사용되고 있는 가열장치 중 가장 신뢰성 있는 주가열 장치이며, 수소 양이온 입자를 높은 전압을 이용해서 빠른 속도로 가속한 후 핵융합반응을 일으킬 수 있는 충분한 온도로 올라가게 해주는 보조 가열장치이다.

2. Arc Power Supply의 구성 및 동작개요

2.1 NBI 시스템 구성

NBI장치 구성으로는 Filament Power Supply(FPS), Arc Power Supply(APS), Bias Power Supply(BPS), G1 Power Supply, G2 Voltage Divider, G3 Power Supply, Ion source, Arc chamber로 구성되어 있다. FPS는 Ion source 안에 플라즈마가 형성될 수 있도록 전력을 공급하여 가열한다. 이때 Ion의 내부온도가 과도한 열부하로 Ion source의 수명을 단축 및 손상을 초래하기 때문에 G1, G2, G3를 이용하여 내부온도를 감속과 가속을 한다. Ion source에 플라즈마가 생성 후 APS로 전력을 공급하면 아크가 발생한다. Arc chamber는 ion source에 생성된 Arc가 토카막으로 지나갈 수 있도록 통로를 만들어 준다.

2.1 제안된 Arc Power Supply

제안된 APS는 저전압, 대전류의 특성을 가지고 있기 때문에

이를 고려하여 전력변환기가 설계되어야 하고, 시스템이 안정성이 보장되어야지만 APS로 사용할 수 있다. 그러므로 낮은 출력전압과, 대전류를 분배하여 시스템을 안정화하는 제안한 병렬 벡 컨버터가 적당하다.

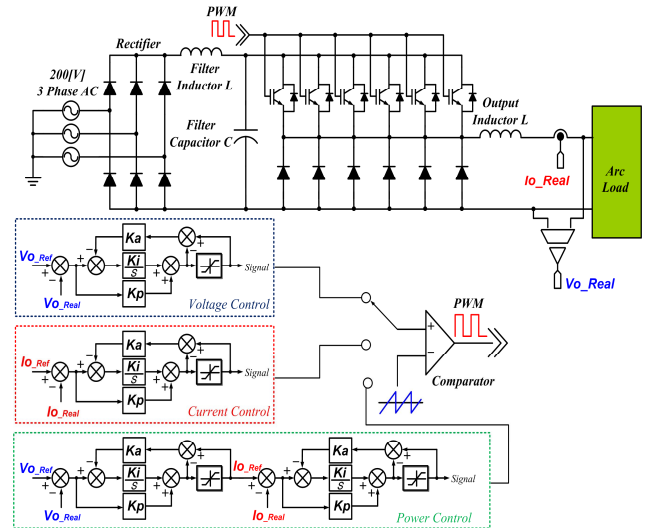


그림 1. Arc power supply system

그림 1은 APS의 시스템 구성을 나타낸다. 제안된 벡 컨버터는 기본적으로 대용량 6 병렬 IGBT와 Chopping 인덕터로 구성된다. 병렬 운전은 용량의 확대뿐만 아니라 대전류의 도통 손실을 줄이기 위해서는 병렬 구성이 유리하며, 시스템의 안정성 및 손실저감을 한다. 제안된 아크 전원은 기본적인 특성이 전류원이다. 전류원 컨버터는 병렬 운전시 각 스위치의 동작 특성에 따른 IGBT의 병렬 운전의 문제를 해결할 수 있다.

2.2 시스템 설계

2.2.1 다이오드 정류기 설계

정류기의 설계는 반도체 다이오드의 최대 정격과 접합부 온도의 최대값 결정하는 것을 포함한다. 최대 정격의 충족은 다이오드의 역전압 최대값, 평균 정류 전류, 돌입 전류의 최대값으로 결정한다.

- (1) 다이오드의 역전압, 평균 정류 전류, 돌입 전류

다이오드의 역전압은 캐소드 애노드 사이에 반복 인가되는 역전압의 최대 허용값이다.

$$PIV = \sqrt{2} \times \sqrt{3} \times V_{rms} \times k \quad (1)$$

식(1)은 역전압의 최대값을 나타낸다. 역전압의 최대값은 피크 전압값에 여유계수를 고려한다. 유도부하인 경우, 전원 개폐 시나 스위칭 시 등 과도적인 고전압이 인가될 때 중요한 파라미터이다. 평균 순방향 전류는 최대 입력전류에 실효치로 나타낸다.

$$i_{rms} = \frac{\frac{P_{out}}{\eta}}{V_{in\ rms}} \times k \quad (2)$$

식 (2)는 P_{out} : 정격출력, η : 변환 효율, V_{in} : 입력전압 RMS, k : 여유계수를 고려하여 계산한다. 돌입 전류의 최대값 입력에 따라 피크 타이밍에서 전원을 투입하면 커패시터에 큰 돌입 전류가 흐른다. 이 전류로 다이오드가 파괴되는 경우가 있다. 최대 돌입 전류는 상용 전원 측을 포함한 회로의 임피던스로 결정된다.

(2)접합부 온도의 최대값

접합부 온도는 다이오드가 파괴되지 않는 온도이다. 접합부의 온도는 손실과 열저항을 고려하여 설계한다. 열저항은 통전 중인 열적 정상상태에서 접합부 케이스 사이의 1W당 온도차이다.

$$T_J = P_{total} (R_{th(j-c)} + R_{th(c-f)} + R_{th(f-a)}) + T_a \quad (3)$$

식 (3)은 다이오드 총 전력손실과 접합부 케이스 히트싱크의 열저항을 이용하여 접합부 온도를 계산하였다.

2.2.2 전류형 벡 컨버터 설계

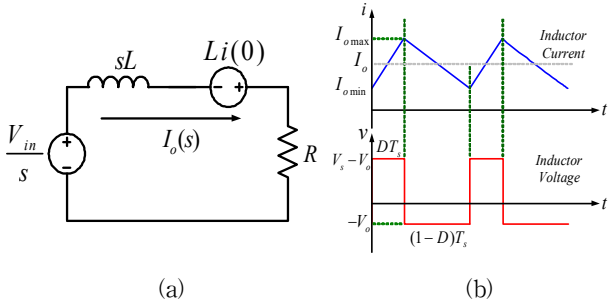


그림 2. (a) 벡 컨버터의 등가회로 (b) 벡 컨버터 정상상태 응답

제한된 벡 컨버터 설계 조건은 정격 부하 10%시 전류 리플이 2% 이내로 만족하도록 설계한다. 제한된 벡 컨버터는 커패시터를 제거하였다. 그러므로 아크 부하에 필요한 출력전압 및 전류 성능을 얻기 위해 출력 인덕터의 설계가 중요하다. 병렬 벡 컨버터에서는 출력단의 커패시터가 없기 때문에 RL 1차 회로의 등가회로로 나타낼 수 있다. 따라서 식 (4)은 RL의 1차 방정식을 이용하여 벡 컨버터의 응답특성을 유도하고 이에 따른 초기값을 대입하여 인덕터의 값을 설계한다.

$$i_L(t) = \frac{V_{in}}{R} = \left(I_o - \frac{V_{in}}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4)$$

스위치 턴 온 초기값은 $t = DT_s$, $I_o = I_{omax}$, 스위치 턴 오프

시 초기값은 $t = (1 - D)T_s$, $I_o = I_{omin}$ 으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_{omin} e^{-\frac{R}{L}DT_s} < I_{omax} & i_L(t) &= I_{omax} e^{-\frac{R}{L}(1-D)T_s} < I_{omin} \\ &= -\frac{RDT_s}{L} < \ln\left(\frac{I_{omax}}{I_{omin}}\right) & &= -\frac{RDT_s}{L} < \ln\left(\frac{I_{omax}}{I_{omin}}\right) \\ &= \frac{RDT_s}{L} < L & &= \frac{RDT_s}{L} < L \end{aligned} \quad (5)$$

3. 실험

본 논문에서는 아크 부하에 필요한 출력전압 및 전류의 성능을 얻기 위하여 실험하였다. 그림 3은 288kW APS 이다.

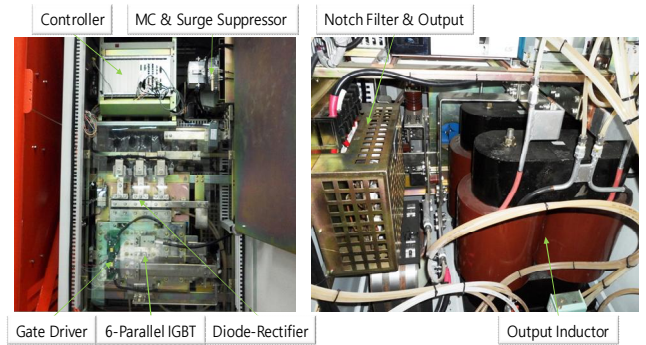


그림 3. 288kW급 Arc power supply

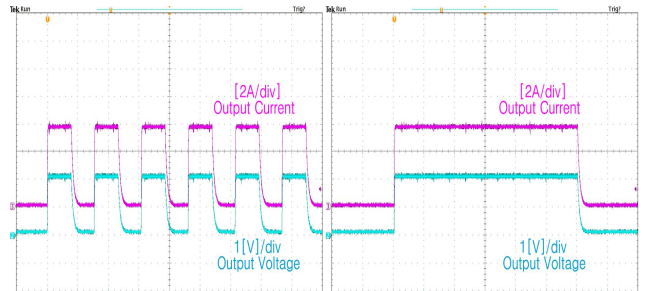


그림 4. 출력전압과 전류

그림 4는 출력전압과 전류이다. 실제 전압과 전류는 160V / 500A이다. 아크 발생 시 출력전압과 전류에 오버슈트가 발생하게 되면 오버슈트에 의해서 원하지 않는 아크가 발생할 수 있다. 따라서 오버슈트 없이 최대한 빠른 정상상태 응답이 가능하도록 제어를 설계하였다.

4. 결론

본 논문에서는 NBI용 APS 시스템을 설계하고 실험을 통하여 다음의 결과를 얻었다. 첫째 벡 컨버터 출력 인덕터의 용량을 설계하고, 전류형 컨버터로 각 스위치의 동작 특성에 따른 IGBT의 병렬 운전의 문제점을 해결하였다. 둘째 저전압, 대전류에서의 동작은 무엇보다도 시스템이 안정되어야 한다. 따라서 실험을 통하여 시스템의 성능을 검증 하였다.

참고 문헌

[1] P.Stevenson, R E Baldwin, V.P.Dunkley, A P. Vadgama, S E. V. Warder, "Design and commissioning of the MAST neutral beam power supplies for the long pulse beam upgrade", Fusion Eng, pp. 1~4, June 2009.