



# 입자빔 가속기용 직류전원장치 기술동향

노 의 철\*

(\*부경대 전기제어계측공학부 교수)

## 1. 머리말

플라즈마를 가열하여 고온플라즈마 상태로 만들기 위한 가열방법 중 하나로 중성입자빔을 이용한 방법이 있다. 중성입자빔 입사장치(Neutral Beam Injection System)는 수십 keV에서 수백 keV의 에너지로 가속된 중성의 수소 또는 중수소의 원자빔을 자장내에 구속되어 있는 고온플라즈마의 중심부까지 관통하여 플라즈마 중심부에 에너지를 전달하여 플라즈마를 가열하는 장치로서 고온플라즈마의 주연료 주입방법으로 이용되며 토카막(Tokamak) 플라즈마의 경우에는 플라즈마 구속에 요구되는 토로이달(Toroidal) 방향의 전류구동과 전류밀도 분포조절 등에도 적용된다. 또한, 플라즈마에 주입된 중성입자빔과 플라즈마의 상호작용을 이용하여 플라즈마 내부의 밀도, 온도, 자장, 플라즈마 전류 및 플라즈마 fluctuations 등의 공간적 분포와 시간적 변화 등을 측정하여 플라즈마의 구속상태와 안정성 등의 분석을 할 수 있는 플라즈마 진단시스템에도 응용된다.

최근 플라즈마의 궁극적인 응용이라 할 수 있는 핵융합에 대한 실험을 수행하고 있는 유럽연방의 JET(Joint European Torus)와 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor) 토카막 핵융합 실험장치에서 수십 MW 급의 중성입자빔을 사용하여 중수소와 삼중수소의 연료를 주입하여 10MW에 달하는 핵융합에너지 발생에 성공함에 따라 핵융합에너지의 실용화 가능성이 확인되어 중성입자빔의 역할과 개발이 강조되고 있다.

고에너지의 중성입자빔 발생 메카니즘은 매우 복잡하고 구현하기도 쉽지 않다. 중성입자빔 입사장치는 기본적으로 이온빔원(Ion Beam Source)과 입자가속장치, Neutralizer, 대용량 진공펌핑 시스템 등으로 구성되어 있으며 발생하는 중성입자빔 에너지는 수십 keV에서 수백 keV이며 전류는 수 A에서 수십 A이다. 이온빔원으로부터 인출된 이온은 수십 kV/mm의 강한 전기장에 의해 가속된다. 이때 효율을 극

대화하기 위해서는 동작전압이 브레이크다운(breakdown) 전압 근처까지 상승할 필요가 있다. 따라서 빔 인출 및 가속이 진행되는 동안 브레이크다운이 자주 발생하게 되는데 이것은 고장이 아니라 중성입자 입사장치의 정상동작의 한 부분으로 간주된다. 정상동작 중 브레이크다운이 발생하면 이온원과 가속 그리드의 손상을 방지하기 위해 피크 전류의 크기가 제한되어야 한다. 피크 전류를 제한하기 위해서는 브레이크다운시 흐르는 전류가 미리 설정된 과전류값을 초과하면 통상 수십  $\mu s$  이내에 가속전원을 차단한다. 그런데 중요한 점은 전체 동작시간을 가능한 한 최대로 하기 위해서 수십 ms 이내에 전원이 재투입되어야 한다는 것이다.

본고에서는 중성입자빔 입사장치의 핵심 역할을 담당하는 입자 가속기용 전원장치의 기술개발 현황을 소개하고자 한다.

## 2. 입자 가속기용 전원장치의 특성 및 활용 예

중성입자빔 입사장치에 사용되는 전원장치는 입자 가속을 위한 주전원 장치와 펄라멘트 가열용 전원장치, 아크 발생용 전원장치 등의 보조전원장치로 구성된다.

표 1은 세계적으로 운영되고 있는 주요 중성입자빔 입사장치의 하나인 유럽연방의 JET(Joint European Torus)를 구성하는 각 전원장치의 사양을 나타낸다. 이들 보조전원장치의 출력용량은 주전원 장치에 비해 매우 작고 사양도 특수하지 않으므로 장치의 구성이 비교적 간단하다. 그러나 주전원 장치의 경우는 출력전압이 직류 고전압이고 부하가 단락되는 일이 자주 발생하므로 까다로운 특성이 요구된다. 그림 1은 정상동작 중 이온원 내부에 브레이크다운이 발생하는 경우에 요구되는 입자 가속기용 주전원 장치의 이상적인 출력전압 파형을 나타낸다. 임의의 시간  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ 는 정상동작 중 브레이크다운이 발생하는 시점을 의미한다.

표 1. JET를 구성하는 각 전원장치 사양

| Power Supply      | Output Voltage (kV) | Output Current (A) | ac/dc |
|-------------------|---------------------|--------------------|-------|
| Acceleration grid | 80                  | 60                 | dc    |
| Arc               | 0.2                 | 1350               | dc    |
| Filament          | 1                   | 52                 | ac    |
| Snubber bias      | 0.06                | 150                | dc    |
| Bending magnet    | 0.12                | 1000               | dc    |

표 2. 주요 중성입자빔 입사장치

| 장치명     | 주관                   | Toroidal Magnetic Field (T) | 입사장치 용량                     |
|---------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| D-III-D | 미국<br>General Atomic | 2.0                         | 80keV, 20MW                 |
| JET     | 유럽연합                 | 3.5                         | 80keV, 40MW<br>140keV, 40MW |
| JT-60U  | 일본<br>JAERI          | 4.5                         | 75keV, 40MW                 |
| TFTR    | 미국<br>PPPL           | 5.0                         | 120keV, 30MW                |
| TPX     | 미국<br>PPPL           | 4.0                         | 120keV, 8MW                 |

브레이크다운이 검출되면 수십  $\mu\text{sec}$  이내에 직류출력전원이 차단되어야 하며 차단시간은 전원장치의 용량과 부하에 따라 결정된다. 전원이 차단되면 브레이크다운 현상은 소멸되므로 통상 수십 msec 이내에 전원을 재투입할 필요가 있으며 이는 전체 운전시간을 극대화하기 위한 것이다. 즉, 그림 1에서  $t_1$ 과  $t_2$  간의 시간간격  $t_2 - t_1$  ( $t_4 - t_3$ ,  $t_6 - t_5$ )이 수십 msec로 되어야 한다는 것이다.

표 2는 현재 세계적으로 운영되고 있는 주요 중성입자빔 입사장치를 나타낸다.

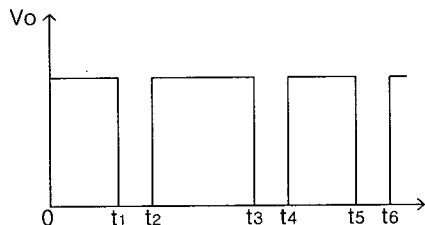


그림 1. 브레이크다운 발생시 요구되는 입자가속기 전원장치의 이상적인 출력전압 파형

### 3. 입자 가속기용 전원장치의 회로방식 및 기술동향

고전압 대용량 응용 시스템에서 그림 1과 같은 이상적인 직류출력전압 파형에 가까운 파형을 얻는 것은 결코 용이

한 일이 아니다. 그림 1의 파형과 유사한 특성을 갖는 고전압 직류전원장치들 중에서 대표적인 방식 몇가지를 기술하면 다음과 같다.

#### 3.1 진공관 방식의 전원장치

그림 2는 진공관방식 중성입자빔 가속기용 전원장치의 일반적인 구성도를 나타낸다. 전원장치는 기본적으로 사이리스터 AC/AC 위상제어 컨버터, 3상 승압 변압기, 3상 다이오드 전파정류기, 직류 필터 커패시터, 크로우버 스위치, 4극 진공관 등으로 구성된다. 3상 교류 입력전압은 진공관의 손실을 최소화 할 목적으로 사이리스터 위상제어 컨버터에 의해 그 크기가 제어된다. 승압 변압기의 2차측 전압은 원하는 직류 전압의 크기와 진공관 전압을 고려하여 결정된다. 진공관의 주된 역할은 출력전압 안정화 및 부하측에 브레이크다운 발생시 고속으로 전원을 차단하는 것이다. 대전력 진공관은 수십  $\mu\text{sec}$  이내의 고속 스위칭 성능을 갖고 있는데, 예를 들어 50kV, 30A 정격의 TM-703F 4극 진공관을 사용한 경우, 출력전압의 상승 및 하강시간을 25  $\mu\text{sec}$  이내로 할 수 있다. 간혹 진공관 내부에서 플래쉬오버(flashover)가 발생하는데 이런 경우에는 진공관이 제어불능 상태로 되므로 시스템을 보호하기 위하여 크로우버 스위치를 작동시킨다. 이온 빔원과 전원장치를 보호하기 위하여 고장 검출기가 다수 설치된다. 보호회로는 회로단락, 과전류, 과전압, over-spark trip-count 등을 포함한다. 고장이 발생하면 고장신호는 보호회로로 전달되어 즉시 진공관을 오프하도록 한다. 부하 단락시 단락전류 차단성능의 신뢰도를 높이기 위해 먼저 진공관의 스크린 그리드 전압을 신속히 제거하고난 후 제어 그리드를 차단한다. 진공관이 고속 스위칭 성능을 갖고는 있으나 다음과 같은 단점을 안고 있다.

- 이온빔원에서 스파크가 발생할 경우 간혹 진공관 내부에 플래쉬오버(flashover)가 발생한다. 따라서 이런 경우에 진공관과 이온원을 보호하기 위하여 크로우버 스위치(crowbar switch)가 추가된다.

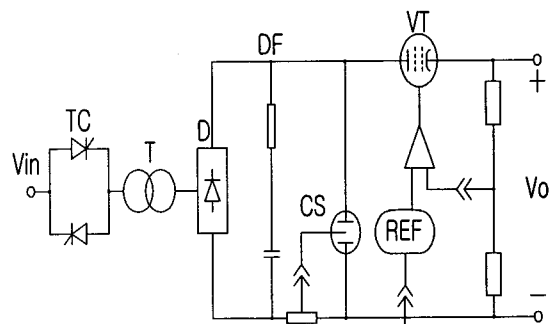


그림 2. 진공관방식 중성입자빔 가속기용 전원장치의 전형적인 구성도

(TC : Thyristor AC/AC Phase Controlled Converter, T : Transformer, D : Diode Rectifier, CS : Crowbar Switch, VT : Vacuum Tube, DF : DC Filter)

- 진공관의 애노드 손실이 매우 커서 이온 열한 온도상승을 억제하기 위해 수냉설비가 필요하다.
- Hold-off 상태에서 X-선을 방출하므로 납차폐 장치가 필요하다.
- 수명이 비교적 짧고 유지보수가 용이하지 않다.

### 3.2 GTO 사이리스터 스위칭 방식의 전원장치

앞에서 진공관 방식의 일반적 특성을 살펴보았다. 진공관이 안고 있는 피할 수 없는 단점들을 개선 및 극복하기 위하여 진공관 스위치를 GTO 사이리스터로 대체한 방식이 개발되었다. 80년대 들어서면서 GTO 사이리스터의 대용량화 기술이 급속도로 발전하여 온·오프 제어가 가능한 GTO 소자를 대전력 시스템에 본격적으로 활용하기에 이르렀다.

그림 3은 GTO 사이리스터를 스위칭 디바이스로 사용한 증성입자빔 입사장치의 가속전원장치의 일반적인 구성도를 나타낸다. 3상 다이오드 정류기 출력단까지의 회로구성은 그림 2에서의 진공관 방식과 유사하다. 출력전압 제어는 교류 입력단의 SCR 사이리스터 위상제어 컨버터에 의존한다. GTO 사이리스터 스택은 다수의 GTO 소자를 직렬 연결하여 구성되는데 도시바사가 개발한 120kV, 50A 급 전원장치의 경우 2500V, 600A 정격의 GTO 소자를 120개 직렬 연결하였다. 도시바가 개발한 증성입자 입사장치용 가속전원은 1차 가속전압이 40kV, 2차 가속전압은 90kV, 3차 가속전압은 120kV로 3단의 가속전압으로 이루어진다. 그림 4는 도시바가 개발한 250kV, 50A급 전원장치의 GTO 사이리스터 스택의 외형도를 나타낸다. GTO 사이리스터를 이용한 방식은 진공관 방식에 비하여 수명이 반영구적이고, 유지보수가 용이하며 크로우버 스위치가 별도로 필요하지 않으며, 복잡한 수냉설비가 필요없다는 등의 장점을 갖는다. 그림 3에서 인덕터 L은 단락전류의 증가율을 제한하여 GTO 사이리스터가 충분히 턴오프 할 수 있도록 한다.

그림 5는 하나의 GTO 사이리스터를 사용하여 3상 다이오드 정류기와 함께 chopper를 구성한 module을 수십개 직렬

연결하여 입사장치용 가속전원에 적용한 경우를 나타낸다. 주 변압기는 4대로 이루어져 있으며 각 변압기의 2차측에는 다수의 권선이 각각 절연되어 2차권선을 형성한다. 각각의 권선전압은 3상 다이오드 정류

기를 입력단으로 하는 chopper module에 연결된다. 이러한 방식의 특징은, 1) GTO 사이리스터를 포함하는 스위칭 소자들의 전압 스트레스가 작고, 2) 일부 모듈에 고장이 발생하더라도 동작이 가능하므로 시스템의 신뢰도가 높고, 3) 유지보수가 용이하다는 점이다. 그러나 각 변압기의 2차측에 각기 절연된 2차측 권선이 너무 많아서 변압기 구조가 복잡하다는 문제가 있다.

표 3은 진공관 방식과 GTO Chopper module화 방식과의 비교를 보인다.

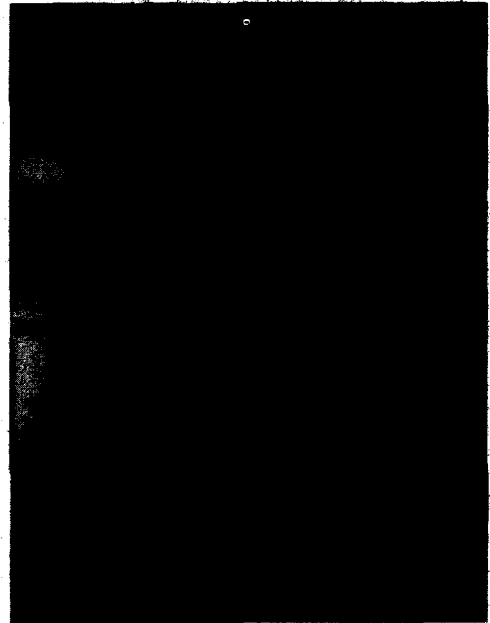


그림 4. 도시바가 개발한 250kV, 50A급 가속전원 장치의 GTO 사이리스터 스택

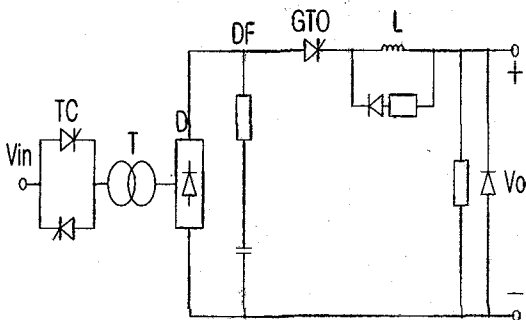


그림 3. GTO 사이리스터 스위칭방식 전원장치의 일반적인 구성도

(TC : Thyristor AC/AC Phase Controlled Converter, T : Transformer, D : Diode Rectifier, DF : DC Filter, GTO : GTO Thyristor Stack, L : Inductor)

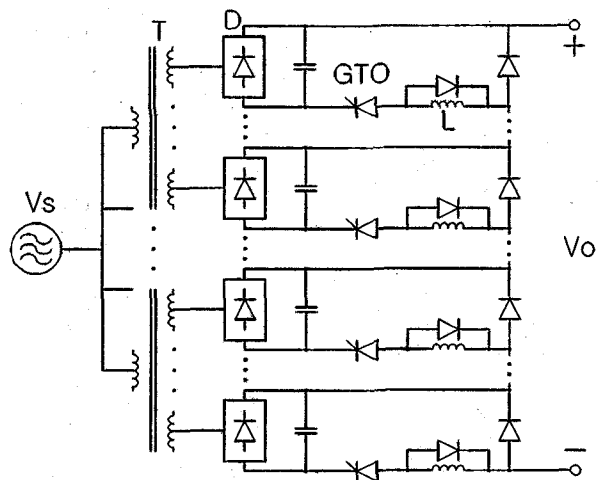


그림 5. GTO Chopper module로 구성된 가속전원장치

(T : Transformer, D : 3 Phase Diode Rectifier, GTO : GTO Thyristor, L : Inductor)

표 3. 진공관 방식과 GTO Chopper module화방식의 비교

|                       | Module화 방식  | 진공관 방식       |
|-----------------------|-------------|--------------|
| Losses                | Small (<1%) | High (6~20%) |
| Reactive power        | Small       | High         |
| Harmonic content      | Small       | High         |
| Ripple                | -           | ≤ 0.5%       |
| Auxiliary effort      | Small       | High         |
| Range of fast control | 0~100%      | 80~100%      |

### 3.3 인버터 방식의 전원장치

중성입자빔 입사장치용 가속전원에 직류 출력의 스위칭 디바이스로 GTO 사이리스터를 사용하게 됨으로써 대전력 4극 진공관 스위치가 갖는 단점들을 극복하게 되었으나, GTO 사이리스터를 사용한 방식에서도 GTO 소자를 다수 직렬연결하여 구성하는 경우는 역시 몇가지 문제점을 안게 된다. 다수의 GTO 소자를 직렬연결하여 하나의 스위치로 구성함에 따라 스위치가 차지하는 크기가 매우 커지며 온·오프 제어시 신뢰성 확보가 어렵다. 따라서, 전원장치의 직류 출력측에 스위치를 설치하는 방법보다는 인버터단을 삽입하여 인버터에 의해 출력 스위칭 기능도 확보하는 방향의 연구개발도 진행되고 있다.

그림 6과 표 4는 각각 일본이 보유, 운영하고 있는 입사장치 중 하나인 JEBIS의 회로구성과 사양을 나타낸다. 그림 6에서 INV는 단상 인버터를 의미하며 인버터의 스위칭 소자는 IGBT이며 IGBT의 스위칭 주파수는 5kHz이다. 직류 출력측 리플성분을 최소화하기 위하여 10개의 인버터 각각의 스위칭 타이밍을 시프트 한다. 출력전압의 크기는 각 인버터의 PWM 제어에 의해 조절된다. 승압용 변압기 구동 주파수가 5kHz이므로 변압기 손실을 줄이기 위하여 변압기의 자속밀도를 낮게 설정한다.

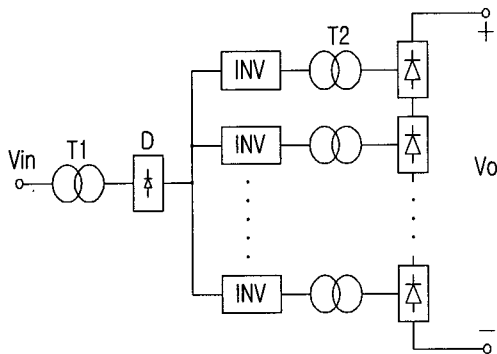


그림 6. JEBIS의 가속전원장치 회로구성도  
(T1 : Transformer, D : 3 Phase Diode Rectifier, INV : 1φ Inverter, T2 : Step-up Transformer)

표 4. JEBIS의 전원장치 사양

| Power Supply                 | Output Voltage | Output Current |
|------------------------------|----------------|----------------|
| Cathode                      | 15V            | 250A×4         |
| Arc                          | 120V           | 500A           |
| Acceleration                 | 100kV          | 5A             |
| Electron recovery            | 5kV            | 5A             |
| Deflecting and sweeping coil | ±70V           | ±200A          |

그림 7은 SIMENS가 제안한 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 장치를 위한 가속전원장치의 회로구성을 보인다. 교류 입력전원은 SCR 사이리스터를 사용한 위상제어 정류기에 의해 직류전원으로 변환되어 3-level GTO Inverter로 입력된다. GTO Inverter 각각의 스위칭 주파수는 400Hz이며 인버터 출력전압은 상호 15°의 위상차를 갖는다. 직류 출력전압의 크기는 SCR 위상제어 정류기의 출력에 의해 제어되며 GTO Inverter는 직류를 교류로 변환하는 기능과 출력전원 차단 및 재투입 기능을 담당한다.

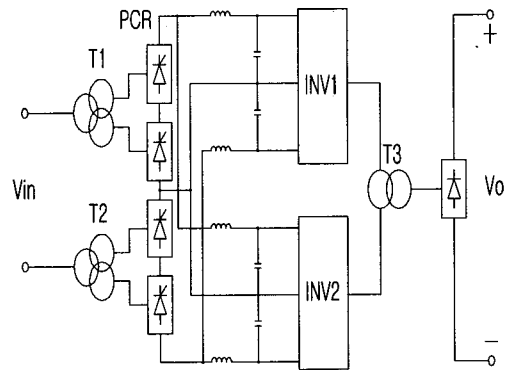


그림 9. SIMENS가 제안한 ITER 장치의 가속 전원장치 회로구성도

(T1~3 : Transformer, PCR : Phase Controlled Rectifier, INV1,2 : 3-level Inverter)

## 4. 국내 기술현황 및 전망

중성입자빔 입사장치용 가속전원장치와 관련된 국내의 주요 장치로는 표 5에 보인 핵융합 연구장치를 들 수 있다. 『한빛』 장치는 대형 자기저울형 초고온 플라즈마의 가열 및 밀폐 장치로서 다양한 가열장치와 침단 진단·제어 장치를 설치하여 운영 중에 있다. KAERIT(KT-1) 소형 토카막 장치는 1992년 한국원자력 연구소에 설치 완료되었으며, 한국원자력 연구소는 이어서 1993년부터 자장장도 3 Tesla의 KT-2 중형 토카막 장치 개발을 시작하였다.

표 5. 국내 핵융합 연구장치 보유현황

| 기관            | 연구장치                 | 특성    |
|---------------|----------------------|-------|
| 기초과학<br>지원연구소 | 「한빛」 대형 플라즈마<br>연구장치 | 자기거울형 |
| 한국원자력연<br>구소  | KAERIT(KT-1) 토카막     | 소형토카막 |
| 한국과학<br>기술원   | KAIST 토카막            | "     |
| 서울대학교<br>공과대학 | SNUT-79 토카막          | "     |

KAIST 토카막은 1978년 미국 텍사스 주립대학의 Fusion Research Center에서 개발 제작된 「PreTEXT」 토카막 장치를 1990년 KAIST 물리학과 내에 이전 설치한 장치로써 자장강도 1 Tesla의 소형 토카막이며 토카막 장치의 운전과 관련된 제어계통, 진단계통 개발과 핵융합 기초연구 수행에 활용되고 있다. SNUT-79 토카막 장치는 국내 핵융합 연구장치로는 최초로 1979년 개발·설치가 시작되어 1989년 제1단계 건설이 완료되어 서울대학교 원자력공학과에 설치되었으며 토카막 장치의 운전·제어 및 가열연구 등 핵융합 기초연구를 수행 중에 있다. 그러나 이들 장치에 중성입자빔 입사장치가 적용된 것은 아니다. 국내의 입사장치 개발은 기초단계에 있으므로 표 5의 핵융합 연구장치를 위한 플라즈마 가열은 중성입자빔에 의해 이루어지지 않고 대부분 Ohmic heating에 의존하고 있는 실정이다.

최근들어 플라즈마 내부 진단용 중성입자빔 입사장치를 제작하여 이를 한빛장치에 설치, 실험을 함으로써 플라즈마 가열 및 전류구동용 중성입자빔 입사장치의 기술 확보를 목적으로 개발이 진행되고 있다. 또한, 1995년 말부터 시작된 「국가 핵융합 연구개발 기본계획」의 첫단계로 선도기술개발사업(G7사업)으로 착수된 「차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업」에 의해 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치가 「핵융합 연구개발 사업단」이 개설되어 있는 기초과학지원연구소의 총괄하에 개발중에 있다. KSTAR 장치에서 이온가열과 플라즈마 연료공급을 담당하여 토카막 플라즈마의 주 가열원으로 활용될 중성입자빔 가열장치의 용량은 120kV, 65A 급이다.

우리나라에서도 본격적으로 핵융합 연구개발 사업이 진행됨에 따라 중성입자빔 입사장치의 가속전원 관련 기술 확보가 시급하며 확보된 설계·제작 기술은 고전압 대용량 직류전원장치 응용분야에 미치는 파급효과가 매우 클 것으로 전망된다.

### 5. 맺는말

본고에서는 중성입자빔 입사장치에 있어서 가장 중요한 전원장치인 입자가속용 전원장치가 갖추어야 할 특수한 성

능 및 성능 확보를 위한 회로방식과 기술동향에 대하여 살펴 보았다. 입자빔 가속을 위한 전원장치의 경우는 일반적인 고전압 직류전원장치가 요구하는 성능 외에 직류출력전원이 부하로부터 수십  $\mu\text{sec}$  이내에 차단되고, 차단 후 수십 msec 이내에 재투입 될 수 있는 빠른 출력 스위칭 특성이 요구된다. 이것은 이온빔원 내부에서 발생하는 브레이크다운시 과도한 전류에 의한 이온빔원 및 전원장치의 손상을 방지할 뿐 아니라, 브레이크다운이 소멸됨과 동시에 전원을 재투입하여 운전시간을 극대화하기 위한 것이다. 이러한 고속 출력 스위칭 특성을 구현하기 위하여 직류출력단에 대용량 4극 진공관을 사용하거나 또는 이보다 개선된 방법으로 GTO 사이리스터를 다수개 직렬연결하여 사용하기도 한다. 최근에는 IGBT나 GTO 인버터를 사용하여 장치를 소형·경량화 하는 추세이다.

플라즈마 가열을 위한 중성입자빔 입사장치용 가속전원 장치는 현재 세계적으로 과학기술 선진국에 의해 수십 MW 급 용량으로 개발되어 운영중에 있다. 미국의 TFTR와 D-III-D 토카막에서 각기 20MW 이상의 전원장치를 운영중에 있고, 유럽연방의 JET 토카막의 경우는 40MW 이상, 일본의 JT-60U의 경우도 40MW 이상의 전원장치가 개발되어 운영 중에 있다. 국내에서는 기술개발 수준이 초보 단계이지만 핵융합 연구장치로 건설 중인 KSTAR 장치를 위한 120kV, 65A 급 중성입자빔 가속전원장치가 개발중에 있는 실정이다.

플라즈마 가열 뿐 아니라 플라즈마 진단시스템으로도 활용되는 중성입자빔 입사장치용 가속전원장치의 성능향상에 관한 설계 및 제작 기술력 확보는 21세기 첨단 과학기술시대의 초대형 특수 실험장치 및 대형장치산업의 지속적·비약적 발전에 기여하는 바가 클 것으로 전망된다.

### 참고문헌

- [1] U. Schwarz, U. Braunsberger, A. Furrer, U. Pfister, "The high voltage power supply for the acceleration grids of the textor neutral injectors," Fusion Technology, pp. 823-828, 1984.
- [2] R. Claesen and P. L. Mondino, "Neutral beam injection and radio-frequency power supplies," Fusion Technology, vol. 11, pp. 141-162, 1987.
- [3] Detai Wang, "The development of long pulse high voltage power supply for MNI-IU neutral beam injector," IEEE Proc. 13th symp. on Fusion Eng., vol. 2, pp. 1210-1213, 1989.
- [4] D. T. Wang, X. W. Xu, et al., "The power supply and control system for the MM-2U neutral beam injector," IEEE Proc. 15th symp. on Fusion Eng., vol. 2, pp. 901-904, 1993.
- [5] P. Bayetti, M. Desmons, "H. V. circuit for a tore supra neutral beam injector," Fusion Technology, pp. 883-888, 1984.



[6] S. Ramakrishnam, O. Nelson Bowen, et al., "Neutral beam power system for TPX," IEEE Proc. symp. on Fusion Eng., pp. 913-916, 1994.

[7] Yukio Watanbe, Nagataka Seki, et al., "Acceleration power supply system for neutral beam injector using GTO," IPEC, pp. 808-819, 1983.

[8] Y. Suzuki, M. Naito, et al., "A power supply system for a 125keV/250keV neutral beam injector test stand based on negative ion sources," Fusion Engineering and Design, vol. 26, pp. 535-538, 1995.

[9] M. Mizuno, M. Dairaku, et al., "Inverter type high voltage dc power supply for negative-ion-based neutral beam injectors," IEEE Proc. 13th symp. on Fusion Eng. pp. 575-577, 1989.

[10] M. Kuriyama, N. Akino, M. Araki, et al., "Construction of a 500keV/negative ion based NBI system for JT-60U," IEEE Proc. Symp. on Fusion Eng., pp. 470-473, 1994.

[11] 핵융합 기술 연구 개발기획팀, "핵융합기술 연구개발사업 연구기획 보고서," 1995.

[12] 이경수, "물리학과 첨단기술," July/Aug. pp. 2-6, 1998.

## 저 자 소 개



### 노의철 (魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동대학원 졸업(공학박). 1997년-1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 1995년-현재 부경대학교 공대 전기제어계측공학부 조교수