

20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치 및 원격제어기 개발

정 인화, 김 종수, Gennadi I. Gusev, 류 명효, 백 주원, 임 근희
한국전기연구원

Development of 20kV 10kW High Voltage DC Power Supply and Remote Controller

In-Wha Jeong, Jong-Soo Kim, Gennadi I. Gusev, Myung-Hyo Ryu, Ju-Won Baek, Geun-Hie Rim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문은 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치와 원격제어기의 개발에 대해서 기술하고 있다. 개발된 고전압 직류 전원장치는 다양한 고전압 시스템에 적용하기 위해서 출력전압이 최대 20kV까지 가변 가능하도록 설계되었으며 먼저, 펄스파워 시스템에 필요한 고전압 캐패시터 충전용 전원장치로서 사용하여 동작특성과 신뢰성을 확인하였다. 고전압 직류 전원장치는 단상 고주파 공진형 인버터 방식을 채용하였으며 스위칭 주파수를 최대 100kHz까지 가변시켜 출력전류를 제어하였다. 또한 인버터 출력이 인가되는 고전압 변압기에 2대의 단상 변압기를 사용하여 각각의 출력부담과 전기적 절연내력을 낮출 수 있었다. 한편, 고전압 시스템에 적용할 때, 조작자의 안전성을 높이고 동작상태를 실시간으로 진단하기 위해서 원격제어기를 개발하였으며 다양한 조건에서의 시뮬레이션과 실험을 통해 개발된 고전압 전원장치와 원격제어기의 동작특성을 확인하였다.

캐패시터는 안정성을 고려하여 바닥에 부착되어 있다. 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치는 크게 인버터 부분과 고전압 부분으로 구성되어 있다. 인버터 부분은 3상 380/440V 전압을 외부전원으로부터 공급받고 있으며 입력필터와 입력정류부, 역률 개선용 인덕터, 제어회로부, 그리고 전원장치를 소형화 시킬 수 있도록 내부 누설인덕턴스를 이용하는 직렬공진형 방식의 단상 고주파 공진형 인버터로 이루어져 있다. 한편, 고전압 부분은 2대의 단상 고전압 변압기와 고압정류부, 출력전압 검출부 등으로 구성되어 있으며 최종적으로 부하 캐패시터에 정전류의 충전전류를 공급하게 된다. 또한 기존의 고전압 캐패시터 충전용 전원장치가 1대의 단상 고전압 변압기를 채용하여 전기적 절연문제 때문에 절연유를 사용하게 되는데 반해 본 전원장치는 2대의 단상 고전압 변압기를 사용하여 고전압 변압기와 고압정류부에 인가되는 전기적 절연내력을 낮출 수 있었고 공랭식에 의한 냉각 방식을 통해 안전성과 유지보수성을 크게 향상시킬 수 있었다.

1. 서 론

현재 개발되고 있는 차세대 가속기와 플라즈마를 이용하는 다양한 산업용 장비, 그리고 디지털 X-ray와 같은 첨단 의료기기 등에서 폭넓게 필요로 하는 고전압 직류 전원장치들은 사용의 필요성이 높지만 제한된 수요와 고전압 장치에 따른 안정성과 신뢰성 확보 측면에서 제작에 어려움이 있었기에 그동안 외국 제품이 도입되고 있는 실정이다. 일반적으로 고전압 시스템에서 요구하는 출력조건과 적용분야의 시장수요를 고려하여 출력용량이 10kW이며 출력전압이 최대 20kV인 고전압 직류 전원장치를 개발하게 되었으며 실제 산업현장에 적용한 예로써 가변가능한 정전류로 전력저장용 캐패시터를 20kV까지 충전시킬 수 있는 고전압 캐패시터 충전용 전원장치와 이를 구동시키는 원격제어기를 제작하였다. 개발된 본 전원장치는 최대전력 10kJ/s로 부하 캐패시터를 20kV까지 급속 충전할 수 있도록 설계되었으며 단상 고주파 인버터와 공랭식을 적용한 고전압 변압기를 사용하여 90% 이상의 높은 효율과 우수한 유지보수성을 갖도록 제작되었다. 본 논문에서는 개발된 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치와 원격제어기의 주요 구성과 특징을 설명하고 다양한 조건에서의 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 동작특성을 확인하였다.

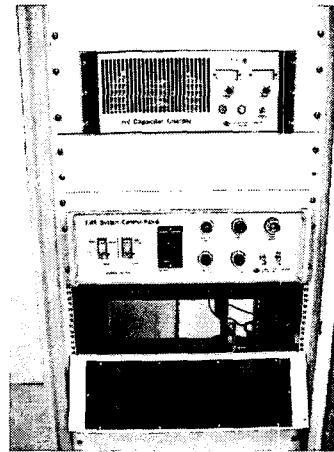


그림 1. 고전압 시스템과 고전압 직류 전원장치 모습

2. 고전압 시스템과 고전압 직류 전원장치

2.1 전체 시스템 및 고전압 직류 전원장치 구성

그림 1은 개발된 고전압 직류 전원장치와 이를 적용한 고전압 시스템을 보여주고 있다. 그림 1에서 보듯 전체 고전압 시스템은 19인치 랙을 사용하고 있으며 고전압 직류 충전용 전원장치는 상부에 실장되어 있고 가운데에는 전체 시스템 제어부와 보호 회로부가 위치하고 있다. 끝으로 고전압 시스템의 출력 에너지를 저장하는 부하

2.2 단상 플브릿지 공진형 인버터

그림 2는 개발된 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치 내부에 실장된 단상 플브릿지 공진형 인버터를 보여주고 있다. 적용된 단상 플브릿지 공진형 인버터의 입력전원은 IXYS사의 다이오드 모듈 FFPF10F150S를 통해 공급되었으며 인버터의 스위칭 소자는 1200V 300A의 IGBT 모듈을 사용하였다. 또한 출력전류를 가변시키기 위하여 인버터의 스위칭 주파수를 최대 100kHz까지 제어할 수 있으며 고주파 스위칭 동작을 통해 인버터 출력을 고전압으로 승압시켜주는 고전압 변압기를 소형화 시킬 수 있었다. 아울러 전원장치의 효율을 증가시키고 크기와 무게를 감소시키기 위해서 추가적인 공진용 인덕터를 사

용하는 대신에 고전압 변압기 자체의 누설 인덕턴스를 이용하여 직렬 공진회로를 구성하였다.

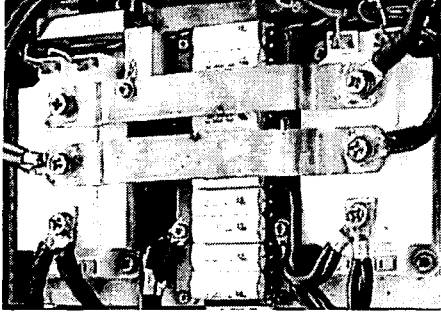


그림 2. 단상 풀브릿지 공진형 인버터 스택 모습

2.3 고전압 출력부

단상 풀브릿지 공진형 인버터에 연결된 고전압 변압기는 최대 20kV까지 부하 캐패시터를 정전류로 충전할 수 있도록 1차측에 인가되는 인버터 출력전압을 승압시켜 준다. 본 전원장치에서는 고전압 변압기의 2차측 권선수를 줄이고 궁극적으로 전기적 절연내력을 낮출 수 있도록 2대의 단상 고전압 변압기를 병렬로 사용하여 각각의 출력전압이 더해지도록 설계하였다. 제작된 고전압 고주파 변압기는 TDK사의 페라이트 코어를 사용하여 고주파 동작에서의 와전류손을 감소시킬 수 있었다. 이렇게 얻어진 고전압 출력은 고압 다이오드로 이루어진 고압정류부를 거쳐 최종적으로 부하 캐패시터에 출력된다.

그림 3은 입력전원용 단자대와 전원장치의 냉각을 위해서 사용되는 팬, 그리고 고전압 출력이 인출되는 전원장치의 후면 모습을 보여주고 있다. 전원장치 내부에서 고전압 변압기와 고전압 출력부는 앞단에 위치하고 있으며 후면에 위치한 팬에 의해서 냉각된다.

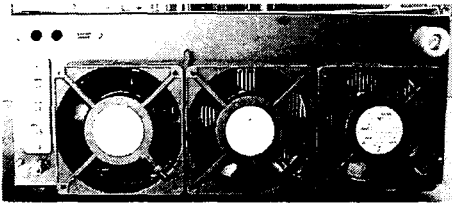


그림 3. 고전압 직류 전원장치의 후면 모습

2.4 제어 회로부 및 원격제어기

고전압 전원장치가 최대 20kV 전압까지 안정되게 동작하기 위해서는 고전압 출력과 같은 전기적 상태값과 전원장치 내부소자의 온도변화 등을 지속적으로 감시하여 전원장치의 동작에 문제가 발생하였을 경우, 고전압 출력을 안전하고 신속하게 고전압 시스템으로부터 차단하여 전체 고전압 시스템을 보호하여야 한다.

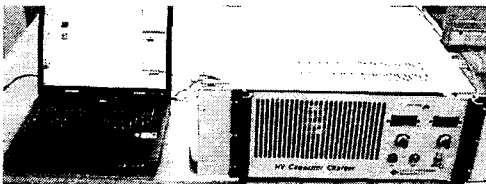


그림 4. 20kV 10kV급 고전압 직류 전원장치와 원격제어기

그림 4는 개발된 고전압 직류 전원장치와 원격제어기를 보여주고 있다. 전원장치 내부의 제어 회로부와 원격제어기는 부하에 공급되는 출력전압과 전류를 실시간으로 제어할 뿐만 아니라 전원장치 내부 소자의 온도와 출력의 이상여부를 진단하여 이를 조작자와 전체 시스템에 알리는 역할을 수행하고 있으며 그밖에 고전압 캐패시터 충전용 전원장치로서 사용되는 경우에는 반부충전에서의 보호기능과 병렬운전에서 제어기능을 추가로 제공하고 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

개발된 고전압 전원장치의 전기적 모델을 PSpice에 적용하여 얻어진 시뮬레이션 결과는 그림 5-6에서 보여지고 있다. 수행된 시뮬레이션에서 부하 캐패시터는 0.05μF, 충전전압은 20kV, 그리고 인버터의 스위칭 주파수는 50kHz로 설정되었다.

그림 5는 부하 캐패시터의 충전전압과 단상 풀브릿지 공진형 인버터로부터 인가되는 고전압 변압기의 1차측 입력전류의 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과에서 나타나듯 고전압 변압기 1차측에 흐르는 전류의 피크값은 약 200A임을 관측할 수 있다.

그림 6은 부하 캐패시터를 최대 충전전압 20kV로 충전할 때의 출력되는 충전전압과 충전전류의 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 0.05μF의 부하 캐패시터를 20kV까지 충전하는데 충전전류의 평균값은 약 1A 정도이며 소요된 충전시간은 약 1ms임을 확인하였다.

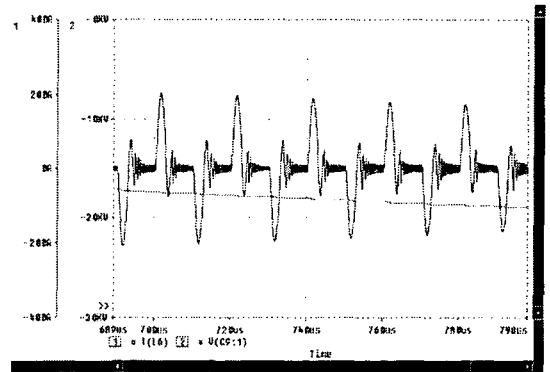


그림 5. 출력 충전전압과 고전압 변압기 입력전류의 시뮬레이션 파형

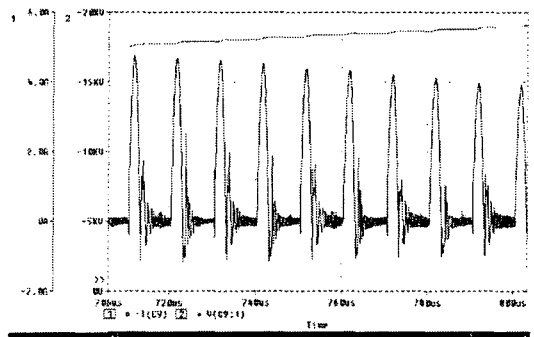


그림 6. 20kV 충전에서의 충전전압과 충전전류의 시뮬레이션 파형

그림 7은 제작된 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치를 보여주고 있다. 본 전원장치는 인버터 부분과 고전압 부분으로 나뉘어 있으며 19인치 표준 랙에 실장이 가능하도록 설계되어 있다. 전원장치의 크기는 435(W)*428(D)*177(H)mm, 전체 무게는 34kg이며 케이스 후면에 위치한 인버터 부분에 냉각용 팬을 설치하여 장시간의 연속운전에서도 안정적으로 동작하도록 냉각구조를 단순화시켰다.

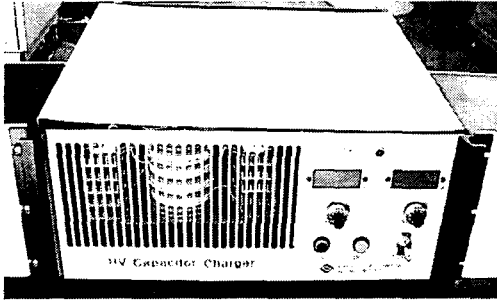


그림 7. 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치

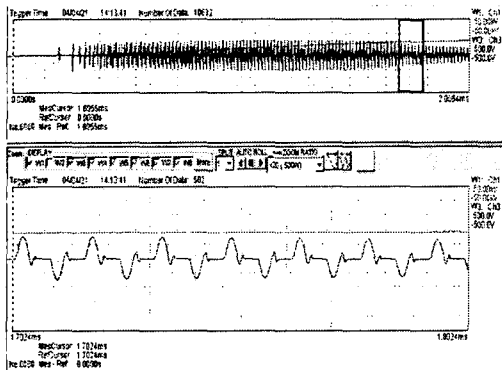


그림 8. 20kV 1A 충전동작에서의 출력전압과 고전압 변압기 입력전류 파형

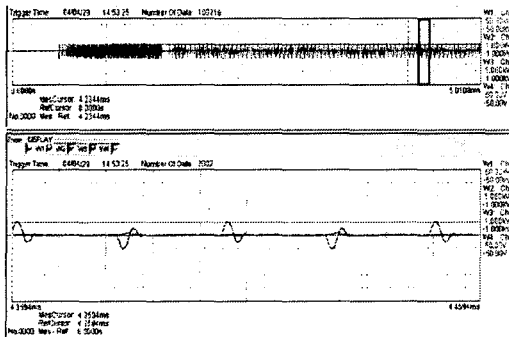


그림 9. 10kV 0.2A 충전동작에서의 출력전압과 고전압 변압기 입력전류 파형

그림 8은 0.1μF의 부하 캐패시터를 최대 출력전압 20kV까지 1A의 정전류로 충전할 때의 고전압 변압기 1차측 입력전류와 충전전압의 실험 파형을 보여주고 있다. 실험 결과에서 보듯 고전압 변압기 입력전류의 최대 피크값은 약 200A이며 인버터의 스위칭 주파수는

65kHz, 그리고 충전시간은 2ms임을 알 수 있다.

그림 9는 0.1μF의 부하 캐패시터를 최대 출력전압 10kV까지 0.2A의 정전류로 충전할 때의 실험 파형을 보여주고 있다. 실험 결과에서 보듯 출력전류를 1A에서 0.2A로 가변하기 위해 인버터의 스위칭 주파수가 65kHz에서 22kHz로 변화된 것을 살펴볼 수 있으며 이때 소요된 충전시간은 5ms임을 확인할 수 있다.

그밖에 다양한 출력조건의 실험을 통해서 고전압 전원장치의 전체적인 동작특성이 시뮬레이션 결과와 유사함을 살펴볼 수 있었고 실험을 통해 전원장치의 전체 효율은 90%정도이고 역률은 0.85 이상임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 20kV 10kW급 고전압 직류 전원장치와 원격제어기의 주요 구성과 특징을 설명하고 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 주요 동작특성을 확인하였다. 다양한 고전압 시스템에 적용하기 위해 개발된 본 전원장치는 기존 고전압 전원장치에 비해 고주파 소프트 스위칭 기법을 통해 크기와 무게를 대폭 감소시켰을 뿐만 아니라 주로 독립된 절연유 탱크에 설치되는 고전압 변압기를 2대의 단상 고전압 변압기로 대체함으로써 전기적 절연내력을 낮출 수 있었고 이를 통해 절연유 탱크를 제거하고 전원장치의 케이스 바닥에 그대로 고정할 수 있었다. 아울러 냉각방식을 팬에 의한 공랭식으로 단순화하여 전원장치의 유지보수성을 크게 향상시킬 수 있었다. 전기적 특성측면에서 살펴보면 전원장치의 전체 효율은 90%수준 이상이며 10시간 이상의 연속운전에서도 안정된 동작특성을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Helen Pollock and John O. Flower, "New Method of Power Control for Series-Parallel Load-Resonant Converters Maintaining Zero-Current Switching and Unity Power Factor Operation," in IEEE Trans. Power Electron., vol. 12, no. 1, pp. 103-115, January, 1997
- [2] M. Souda, F. Endo, C. Yamazaki, K. Okamura, and K. Fukushima, "Development of High Power Capacitor Charging Power Supply for Pulsed Power Applications," in Proc. 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., vol. 2, pp. 1414-1416, June 27-30, 1999
- [3] Y.H. Chung, H.J. Kim, and C.S. Yang, "MOSFET Based 20kV, 500A Pulse Generator with Energy Recovery Circuit," in Int. Sympo. Pulsed Power and Plasma Applications, pp. 116-123, October 26-27, 2000