

35kJ/s 고전압 커패시터 충전장치 개발

장성록*, 류홍제**, 김중수**

*과학기술연합대학원대학교, **한국전기연구원

The Development of 35kJ/s High Voltage Capacitor Charger

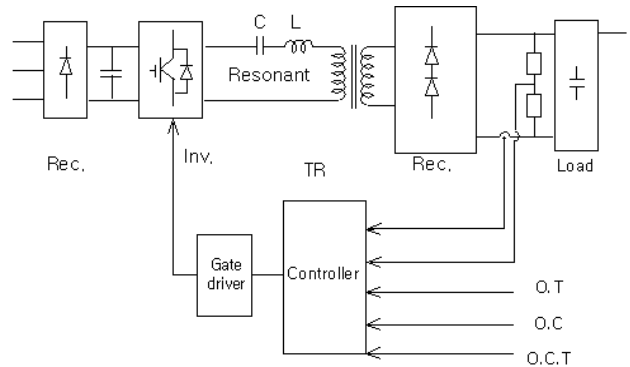
S.R Jang*, H.J Ryoo**, J.S Kim**

*University of Science & Technology, **KERI

Abstract - This paper describes a rapid pulsed power charging system for pulsed power application. It is capable of charging 35kJ/s energy up to 0.47uF 25kV within 3ms and maximum pulse repetition rate of 300 pps can be achieved.

The charger is designed based on three-phase series resonant inverter followed by air cooled set-up transformers thus it has many advantages of lower weight, small size and high efficiency compared with large bulky traditional pulse charger system. Detail design procedure of resonant inverter and high voltage transformers is explained. Experimental results carried out at different condition and its results shows 90% efficiency at full load condition.

고, 공냉식에 의한 냉각방식을 통해 안전성과 유지보수성을 크게 향상시킬 수 있다.



<그림 1> Total structure of Capacitor Charger

1. 서 론

높은 전압을 빠른 시간 내에 충전시키기 위한 펄스전원용 커패시터 충전장치로는 SCR의 위상제어에 의한 고전압 DC 충전기가 주로 사용되어 왔다. 이러한 기존방식의 단점은 60Hz 상용주파수에 의한 위상제어를 수행하므로 인해 변압기 및 전력변환장치의 사이즈가 크고, 효율이 낮으며 무게가 증가하게 된다. 이로 인하여 최근에는 펄스파워 응용분야에 적용 가능한 고주파 공진 방식의 고효율 인버터 방식에 의한 충전방식에 대한 연구가 보고 되고 있다.[1-3]

본 논문에서는 펄스파워 시스템을 구현하기 위한 고전압 커패시터 충전용 전원장치설계에 대하여 기술한다. 시스템에 요구되는 기본 조건은 전체 시스템의 신뢰성을 보장하기 위해서 10kV 이상의 고전압과 높은 반복 충전에서도 안정적으로 동작해야 하며 전체 시스템의 용이한 이동성과 전원장치의 유지보수성을 확보하기 위해서도 최대한 소형, 경량화 시켜야 한다. 이와 같은 필요성에 의해서 펄스파워로 변환하기 위한 입력에너지를 저장하는 고전압 커패시터를 최대 충전전력 35kJ/s, 최대 충전전압 25kV까지 고효율 충전할 수 있어야 하며 3상 고주파 인버터와 공냉식을 적용한 고전압 변압기를 사용하여 90%이상의 높은 효율과 우수한 유지보수성을 갖도록 설계한다. 또한 전원장치의 신뢰성을 향상시키기 위해 출력용량을 고르게 분담하면서 전기적 절연측면에서도 안정된 3대의 단상 고전압 변압기를 설계한다.

상기와 같이 본 논문에서는 25kV, 35kW급 고전압 커패시터 충전용 전원장치의 개발을 위한 상세 설계와 제작된 전원장치를 통해 이루어진 실험 결과에 대해 기술한다.

2. 직렬 공진형 고압충전기 설계

2.1 고압충전기의 기본 구조

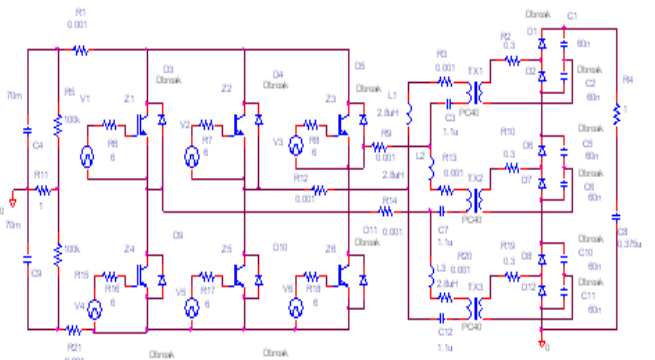
제안한 전원장치는 그림 1과 같이 크게 인버터 모듈과 고전압 모듈로 구성된다. 인버터 모듈은 3상 380/440V 전압을 외부전원으로부터 공급받고 있으며 입력필터와 입력 정류부, 역률 개선용 인덕터, 제어회로부, 그리고 3상 고주파 공진형 인버터로 이루어진다. 공진 인덕터는 전원장치를 소형화시킬 수 있도록 변압기의 내부 누설인덕턴스를 이용한다. 직렬공진형 방식의 독립된 케이스에 실장 되는 고전압 모듈은 3대의 단상 고전압 변압기와 고압정류부, 출력전압 검출부 등으로 구성되어 있으며 최종적으로 고전압 커패시터에 정전류 형태의 충전전류를 공급하게 된다. 또한 본 전원장치는 3상 인버터 방식을 적용하여 각각의 단상 고전압 변압기에 인가되는 전기적 절연내력을 크게 낮출 수 있었

2.2 직렬 공진 컨버터(SLR) 설계

직렬 공진 컨버터는 3개의 동작 모드로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 ZCZV Switching과 제어의 편의를 위해 위해 DCM($f_s < 0.5f_r$) 에서 설계하였다. 공진형 컨버터에서는 스위칭주파수(f_s)와 공진 주파수(f_r)의 비로 출력을 결정 할 수 있는데, 이때 출력 조건과 스위치, 공진 커패시터, 인덕터등의 스트레스를 고려하여 설계하여야 한다. 고전압 커패시터 충전장치의 입출력 조건은 다음과 같다.

- 충전기 정격출력(Pch): 35kJ/s
- 충전기 출력전압(Vout): 25kV
- 입력전압(Vin): 3□~440V±10%
- 인버터 출력 주파수(fs): 25kHz

본 논문에서는 이론적인 계산을 통하여 설계하였고, 이와 같은 결과를 그림2와 같은 simulation model을 사용하여 확인해 볼 수 있다.



<그림 2> Power Stage Simulation Circuit

먼저 주어진 출력조건을 만족시키기 위한 공진 전류를 결정 하고, 이를 통해 공진회로의 특성 임피던스 및 커패시턴스, 인덕턴스를 구성한다. 이때 최소의 입력전압조건과 정격출력을 고려하여야 하고, 수식 (1), (2)를 통해 구한 rms 전류를 얻기 위한 공진 전류의 최대치(I_{peak})를 구한다. $I_{peak} = \sqrt{2} I_{DCrms}$ 로 생각 할 수 있으나 공진 인버터 전류의 특성과 마진을 고려하여 $I_{peak} = 2.5 \sim 2.8 I_{DCrms}$ 정도로 설계한다. 설명한 바와 같이 출력전류를 구하면 다음과 같다.

$$V_{DCmin} = 440 \times 0.9 \times 1.35 \approx 534 [V] \quad (1)$$

$$I_{DCrms} = \frac{2P_{ch}}{V_{DCmin}} = 132 [A] \quad (2)$$

$$I_{peak} = 2.5 I_{DCrms} = 330 [A] \quad (3)$$

DCM에서의 공진 주파수는 스위칭 주파수의 2배 이상이 되어야 하는데, 위에서 구한 공진전류와 IGBT의 스위칭 지연을 고려하면 공진주파수는 수식 (4)와 같이 구할 수 있다. 또한 정해진 공진주파수와 공진특성임피던스(ρ)를 통해 공진 커패시턴스(C_r)와 인덕턴스(L_r)를 수식 (6)을 이용해 결정할 수 있다.

$$f_r = 3.5 \sim 4f_s = 90kHz \quad (4)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \frac{V_{DCmin}}{I_{peak}} \approx 1.6\Omega \quad (5)$$

$$L_r = \frac{\rho}{2\pi f_r} = 2.8\mu H, \quad C_r = \frac{L_r}{\rho^2} = 1.1\mu F \quad (6)$$

이때 공진인덕터(L_r)는 장치의 부피를 줄일 수 있도록 트랜스포머의 누설 인덕턴스를 이용하도록 하며, 이는 수식 (7)과 같이 1차측 turn 수(W1)에 의해 결정할 수 있다. Turn 수와 전압에 따라 적절한 Core 선택도 필요한데, 이는 수식(8)에 의해 Core의 Cross section area(S_c)구하고 그에 따라 Core를 선택한다.

$$W1 = \sqrt{\frac{L_r}{\mu_0 \times P/H \times \Delta_{1-2}}} = 14 \quad \text{where } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (7)$$

P = medial perimeter of winding
 H = length of winding
 Δ_{1-2} = distance between windings

$$S_c = \frac{V_{TR1}}{4k_v \times W1 \times f_s \times B} \quad \text{where } k_v = \text{form factor} \quad (8)$$

V_{TR1} = voltage on W1
 B = maximum induction in the core

V_{TR1} 의 전압을 정의하기 어렵기 때문에 form factor k_v 를 사용하고, $V_{TR1} = V_{DCmin}$ 으로 생각한다. Simulation을 통해 해석해 보면 form factor는 1~1.5가 되고 그 사이 값으로 S_c 를 구한다. 구한 S_c 를 통해 Core로는 PC40 제질의 (UU120*160*20)를 선정 하였다. 그리고 출력전압에 의한 2차측 턴수(W2)를 결정한다. 본 논문에서는 3개의 inverter module을 사용하고, 전파정류 회로를 사용하였기 때문에 수식 (9)와 같이 트랜스포머 2차측 전압을 구할 수 있고, 수식 (10)을 이용해 W2를 구하면 다음과 같다.

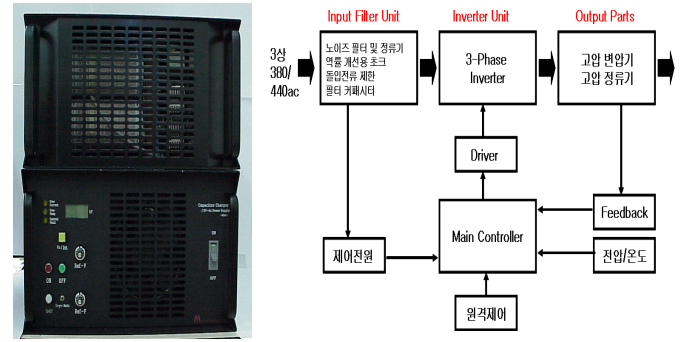
$$V_{TR2} = \frac{V_{out}}{3 \times 2} = 4.16 [kV] \quad (9)$$

$$\therefore W2 = \frac{V_{TR2} \times W1}{V_{TR1}} = 110 \quad (10)$$

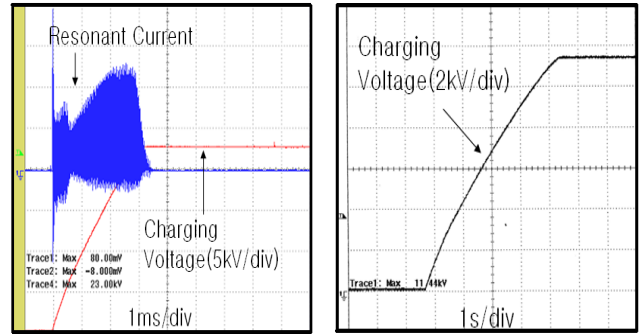
위와 같은 과정으로 Power Stage의 설계는 끝났지만, high voltage application에서는 트랜스포머와 IGBT등에서 발생하는 열에 대하여 생각해야만 한다. 트랜스포머에서 발생하는 열은 core에서 생기는 power loss에 의해 예측할 수 있고, fan을 통한 공냉방식으로 해결한다. 스위치의 열은 스위칭 주파수가 커짐으로써 더 많이 발생하는데, 스위칭 주파수를 줄이면 core에 의한 열이 증가하므로 둘 사이의 관계를 적절히 조절할 필요가 있고, Overtemperature protection 기능도 필요하다.

3. 실험결과

그림3은 제작된 실제 전원장치와 전체적인 블록 다이어그램이다. 정류기를 통해 만들어진 DC 전압을 위의 과정에서 설계한 인버터의 입력전압으로 사용하고, 인버터 출력전류가 고압 정류부를 거쳐 원하는 DC 출력을 얻게 된다. 이때 출력단에서 전류, 전압 sensing을 일정한 출력을 제어하게 된다. SLR 컨버터의 제어는 스위칭 주파수 조절을 통해 이루어지고, 절연된 driver 회로를 통해 IGBT를 on/off 시킨다. 위에서 설명되었듯이 적절한 보호기능이 제어기에 포함되어있다.



<그림 3>Practical Machine and Block Diagram



<그림 4>Experimental Waveforms

그림4는 제작된 고압 충전기를 사용한 충전 결과이다. 좌측 파형은 고반복 펄스응용분야에 적용하기 위하여 0.47 μ F의 고전압 커패시터를 충전전압 23kV로 충전할 때의 충전전류와 충전전압 파형을 보여주고 있다. 0.47 μ F의 고전압 커패시터를 23kV까지 충전하는데 소요된 충전시간은 3ms 정도로 최대 300pps의 펄스 반복 충전이 가능하다. 우측의 파형은 대용량의 고전압 커패시터(1250 μ F)를 충전전압 11.5kV로 충전하는 것으로, 4.7초 정도의 빠른 시간 내에 급속충전이 완료됨을 확인 하였다.

4. 결 론

본 논문을 통해 SLR 방식을 이용한 고전압 커패시터 충전용 전원장치의 설계와 주요 특징을 설명하고, 실험 결과를 통해 확인한 주요 동작특성에 대해서 설명 하였다. 기존의 고전압 전원장치에 비해 크기와 무게를 대폭 감소시켰을 뿐만 아니라 연속운전에서의 안정성을 고려하여 사용되는 수냉식에 의한 냉각방식을 팬에 의한 공냉식으로 전환하여 전원장치의 유지보수성을 크게 향상시킬 수 있었다. 또한 다양한 실험을 통해서 확인한 전원장치의 전체 효율과 역률은 모두 90%수준 이상이었고 10시간 이상의 장시간 연속운전과 병렬운전에서도 안정된 동작특성을 보여주었다. 실험 결과에서 보여 지는 바와 같이 설계 제작된 고전압 커패시터 충전기는 다양한 분야의 펄스전원분야에 고압 충전을 위하여 효과적으로 사용가능함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] A.C. Lippincott, R.M. Nelms, M. Garbi and E.Strikland, "A series resonant converter with constant on-time control for capacitor Charging application", Proc. of the 5th Annual IEEE Applied Power Electronics Conf., pp147-154, 1990
 [2] B.E. Strikland, M. Garbi, F. Cathell, S. Eckhouse and M. Nelms, "2kJ/sec 25kV high-frequency capacitor-charging power supply using MOSFET switches", Proc.of the 1990 19th Power Modulator Symp., pp.531-534, 1990
 [3] A.C. Lippincott and R.M. Nelms, "A capacitor charging power supply using a series-resonant topology, constant on-time/variable frequency control, and zero-current switching", IEEE Trans. on Industrial Electronics, pp438-447,1991