

50 kV 고전압 인버터 고정밀 출력설계에 관한 연구

손 윤규, 서 재학, 오 종석, 조 무현
포항가속기 연구소, 포항공과대학교

Study on the high precision output of 50 kV high-voltage inverter

Y. G. Son, J. H. Suh, J. S. Oh, M. H. Cho
PAL, POSTECH

Abstract - High voltage power supply with pulse load(4.5 μs and PRF 60Hz) condition is investigated which is of interest for applications like Klystron modulator power supplies with output voltage of 50 kV. The performance specifications with this type of power supplies are very stringent demanding tight regulation(< 0.01 %) and high efficiency(> 85 %). The solution to this problem as a single stage converter is very difficult. The final output voltage is obtained as sum of the output of SCPS & PCPS. The combination of the two stages can satisfy the pulse load specifications. The analysis of the voltage and power division between SCPS & PCPS has been done for the proposed topology. It has studied under various operating conditions of line and load. Simulation results are validated by experimental results.

1. 서 론

전자 빔 전송 RF증폭관 전원으로 사용하는 펄스 모듈레이터의 고전압전원으로 CCPS(Capacitor Charging Power Supply)가 사용된다. 펄스 모듈레이터 출력 펄스 평탄부의 전압의 크기가 일정하기 위하여 CCPS의 부하인 PFN(pulse forming network)콘덴서에 충전되는 전압의 안정도는 높게 요구된다. 이 전원의 고전압적인 방식으로는 상용 주파수 승압변압기를 사용하여 2차 측에 정류용 다이오드를 삽입하여 직류전원으로 만든 다음 공진충전에 의한 입력전압의 두 배에 해당하는 전압으로 콘덴서에 충전하여 사용하고 있다. 최근의 전력전자 제어기술과 반도체 소자의 발달로 소프트 스위칭 방법을 이용한 직렬 공진 형 인버터를 사용하면 고전압적인 방식에 비해 전원 장치의 부피와 무게를 줄일 수 있는 이점이 있다. 고 에너지의 양질의 빔 전류를 필요로 하는 포항 방사광 가속기의 제 4세대 형 가속기에 적용 가능한 고전압전원으로 출력전압의 안정도(≤ 0.01 %)와 고효율(> 85 %)을 목표로 하는 설계 중에 있다. 고전압, 고출력, 고안정도를 목표로 하는 전원 장치를 1개의 유닛으로 성능을 달성하기는 매우 어렵다. H-bridge 방식의 영 전압 스위칭 기술을 이용한 위상천이 직렬공진방식의 컨버터로 구성하여 출력안정도를 높이기 위해 각각의 독립된 두 개의 전원에 대한 회로 토폴로지 분석의 결과와 시뮬레이션에 대한 결과를 보이고자 한다.

2. 전원장치의 운전모드

2.1 콘덴서 충전전원

전원장치로는 크게 정전압원 과 정전류원 두 가지로 분류 할 수 있다. 정전압원은 전원내부 임피던스가 작아서 출력전압을 일정하게하기위해 전압피드백회로에 의해 출력 전압을 제어하고 전류 제한이 되도록 설계된다. 정 전류원의 전원은 내부임피던스가 ∞로 커서 부하의 단락에도 전원이 소손되지 않는 장점을 갖고 있다. 부하단락과 반대로 부하 단을 개방시키면 고전압이 유기되어 전원장치를 소손시키는 단점도 있다. 콘덴서에 전압을 충전하는 전원으로서는 정전류원이 필요하며 이 전원의 특징으로는 출력전류가 일정하기 때문에 설정한 시간에 필요로 하는 전압까지 충전할 수 있는 장점이 있다. 알루미늄 필터 콘덴서의 경우는 그 용량이 크고 리플만큼의 에너지를 채우는 기능을 함으로 전류의 크기가 그다지 크지 않다. 임펄스나 수 마이크로초의 펄스를 만드는 회로에 사용하는 콘덴서의 경우는 내압이 높고 용량이 작으며 에너지를 저장한 다음 매우 짧은 시간에 낮은 임피던스 부하에 방전을 하게 됨으로 충전전류의 크기는 작지만 반대로 방전시의 전류는 수백에서 수천 암페어에 이르는 매우 크게 된다. 펄스 모듈레이터 출력 펄스부의 평탄부를 이용하기 때문에 콘덴서에 충전되는 전압이 일정해야 평탄부의 전압은 일정하게 유지된다. 따라서 콘덴서에 충전되는 전압이 일정하게하기위한 전원장치의 제어가 요구된다.

2.1.1 충전주기

콘덴서 충전 전원장치의 충전주기는 충전시간(charging time)과 유지시간(dwel time) 휴지시간(dead time)을 합한 시간이다. 펄스 반복율이 높은 경우에는 충전시간이 빨라야 한다. 동일한 부하 콘덴서에 대해서 충전시간을 빠르게 하는 방법으로는 콘덴서 충전전원의 용량이 커야 하며 이는 출력되는 전원의 출력전류도 커지게 된다.

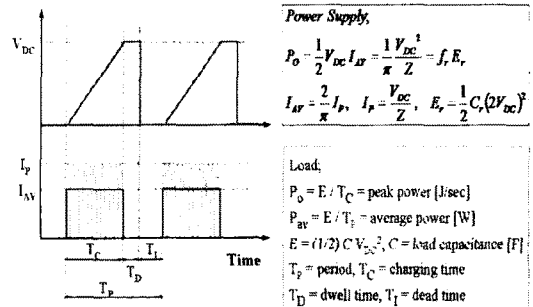


그림 1 Typical CCDS charging profile definitions

충전전류를 크게 하기위해서 콘덴서 충전전원을 여러 대 병렬로 접속하여 사용한다. 전원장치의 대수에 비례해서 충전시간의 상승 기울기는 가파르게 된다. 그림 1은 콘덴서 전원의 충전주기를 나타낸 것이다.

2.1.2 리프레시 모드(Refresh mode)

콘덴서에 충전이 완료되고 난 다음 자체 방전에 의한 충전 전압강하분을 재충전하는 구간으로 설정전압을 유지하기 위한 제어 모드가 필요하다. 이 구간의 동작 특성은 충전된 전압의 안정도를 결정한다. 충전 구간이후부터 부하 방전 직전까지 콘덴서 양단의 전압은 재충전, 방전을 계속하게 되고 충전 구간과 같은 모드로 재충전 시 1개의 스위칭 신호에 의한 충전 전압이 클 경우 제어기는 on/off 동작을 하며 충전 전압의 안정도에 나쁜 영향을 미치게 된다. 방전스위치에 의해 방전이 이루어지고 난 직후 콘덴서는 다시 충전을 하게 되고 목표로 하는 충전전압까지를 충전한 다음 직렬공진주기에서 공진주파수가 다른 형태로 스위칭 하여 콘덴서에서 강하된 부분만을 빠르게 채워주면 평균적으로 전압의 정밀도가 좋게 나타난다. 이것을 리프레시 모드라고 한다. 콘덴서에 방전이 일어나고 충전되는 후반부의 리플부분에 대한 정밀도를 좋게 하는 역할을 한다.

2.2 전원장치 설계

Full bridge 컨버터를 이용한 출력전압 50 kV, 평균출력 84 kW급의 고전압전원으로 설계하고 공진회로에 직렬로 삽입된 직렬 인덕터와 공진 콘덴서의 값을 계산하고 IsSpice를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 설계된 전원장치의 부하로는 1.2 μF 콘덴서를 선정하였고 출력전압의 상승시간과 공진회로에 흐르는 공진전류를 계산하고 시뮬레이션을 통해서 비교해보았다. 공진에서 공진 주파수는 고주파변압기 누설 인덕턴스와 직렬공진 콘덴서에 의해 결정되는데 회로에서 직렬로 삽입된 공진 인덕터는 고주파변압기의 누설 인덕턴스와 도선에 존재하는 선로인덕턴스 값을 더한 값으로 표현하였다. 표 1은 SCPS와 PCPS인버터의 설계파라메타이다. 공진회로의 공진 주파수 f , 공진최대전류 I_{pk} , 공진임피던스 Z , 스위칭 시간 t_{on} , 최대 스위칭 주파수 f_{max} 는 다음과 같다.^{[1][2]}

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad [Hz] \quad (1)$$

$$I_{pk} = \frac{V_{DC}}{Z} \quad [A] \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$t_{ON} = \frac{1}{2} \times T_0 \quad [\mu s] \quad (4)$$

$$f_{max} = \frac{1}{2(t_{on} + dead\ time)} \quad [kHz] \quad (5)$$

전원장치 설계에서 고주파변압기의 권수비를 결정하는 것이 중요하다. 에너지 손실을 최소화하고 동시에 소형화할 수 있는 고주파변압기 설계 및 제작이 핵심이다. 고주파변압기의 권수비 선정은 공진기 회로의 임피던스를 계산하고, 이때 흐르는 전류를 계산하여 출력전류를 구하고 전류비에 의한 권수비와 인버터전압 V_{ab} 전압과 출력전압의 비를 구한 다음 전류비에 의한 권수비와 전압비에 의해 구한 권수비의 사이 값으로 선정한다. 전류비에 의해 구한 권수비와 전압비에 의해 구한 권수비의 비는

공진주파수와 스위칭주파수의 비와 거의 동일하며 회로 동작 시의 듀티비와 거의 일치한다.^{[3][4]} 권수비를 계산하기위해 시뮬레이션을 이용하여 계산해 본 결과 부하콘덴서 C_L 과 목표전압 V_T , 충전시간 t_c (16.67 ms)동안의 충전 시에 전력은 식(6)에 의해 93.23 kJ/sec가 된다.

$$P_{CH} = \frac{C_L V_T^2}{2t_c} \quad [J/S] \quad (6)$$

충전시의 최대전류 I_{max} 와 전원장치의 평균출력 P_{av} 는 식(7)(8)과 같다.

$$I_{max} = \frac{2 \times P_{CH}}{V_T} \quad [A] \quad (7)$$

$$P_{AV} = \frac{1}{2} V I_{avg} \quad [kW] \quad (8)$$

표 1. 인버터설계 파라메타

Design Parameter	SCPS	PCPS
Output Voltage [kV]	50	50
Resonant Frequency [kHz]	30	30
Peak Charging Rate [kJ/s]	93.23	4.5
Primary AC Voltage [V]	480	480
Duty Max.	0.8	0.8
Load Capacitor [μF]	1.2	1.2
Filtered Primary DC Voltage [V]	648	648
Resonant Impedance [Ω]	1.43	29.8
Resonant Inductance [μH]	7.6	158.1
Resonant Capacitance [μF]	3.7	0.178
Max. Power [kW]	83.9	4.05
Output Average Current [A]	3.73	0.18
Peak Switching Current [A]	453	21.75
Turn Ratio	74	84
Maximum Ambient Operating Temp [°C]	60	60
Efficiency of the Power Supply [%]	<90	<90

SCPS : Standard charging power supply,

PCPS : Precision charging power supply

2.2.1 직렬공진회로 설계

스위칭 모드 전원을 이용한 고전압 인버터는 H-bridge 토폴로지를 이용한 한 주기 동안 직렬공진이 되도록 되어 있다. 공진회로의 설계는 부하에 필요한 용량은 에너지 전달측면에서 보면 같게 된다. 직렬공진회로에 직렬콘덴서에 충전되는 에너지의 양에 공진주파수를 곱하게 되면 식(9)과 같다.^[5]

$$P = f_0 E_0 \quad [W] \quad (9)$$

$$E_0 = 0.5 C_R (2V)^2 \quad [A] \quad (10)$$

f_0 : 공진주파수 [Hz], C_R : 공진콘덴서 [μF], V : 직류전원 [V]

식(10)을 사용하여 직렬공진콘덴서 C_R 을 구할 수 있다. 공진주파수가 결정되면 공진주기에서 공진 인덕터 L_R 을 계산할 수 있다. 공진콘덴서와 인덕턴스 값으로부터 공진회로의 임피던스와 공진최대전류를 구할 수 있다.

2.2 전원장치 토폴로지 전산모사

H-full bridge 방식을 이용한 직렬공진형 인버터의 안

정도($\leq 0.01\%$)와 고효율($> 85\%$)을 구현하기 위한 설계로 두개의 전원을 직, 병렬로 결합하여 시스템을 구성하였다. 이러한 전원의 구성은 다음과 같이 4가지로 생각할 수 있다.

- 1) 정전류원+정전압원 직렬연결
- 2) 정전류원+정전압원 직렬연결
- 3) 정전류원+정전압원 병렬연결
- 4) 정전류원+정전류원 직렬연결

정전압원은 임피던스가 0이고 출력전류가 낮은 특징을 가지고 있다. 그에 비해 정전류원은 임피던스가 ∞ 로 출력전류는 일정한 값을 갖는다.

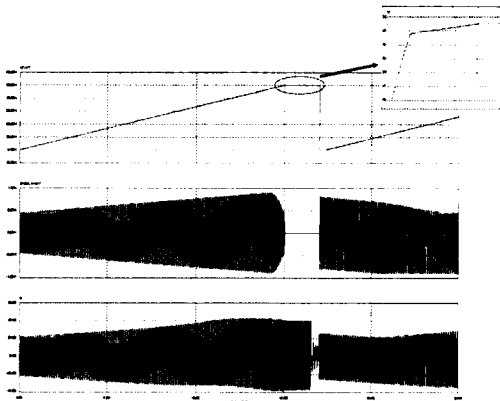


그림 2 SCPS & PCPS 충전전압 및 직렬공진전류

정전압원과 정전류원을 직렬 연결하여 커패시터에 원하는 전압을 충전할 때 정전압원은 정밀전원으로 되어 출력전압은 저압으로 되고 출력전류가 크게 되어 전체적으로 전원장치의 부피가 커지게 된다.

정전류원을 두 개 직렬로 연결할 때는 메인으로 사용하는 충전전원(SCPS)과 정밀충전전원으로 사용하는 레귤레이션 전원(PCPS, 정밀조정전원)의 공진주파수를 다르게 하여 전산모사를 하였다. 이 전원의 경우는 충전전원과 조절전원을 계속 온 하여야만 정밀제어가 가능하며 이중 하나의 전원이 정지하게 되면 운전이 불가능한 상태로 된다.

정전류원과 정전압원을 병렬로 사용한 경우 메인으로 사용하는 충전전원과 정밀충전전원으로 사용하는 조절전원을 병렬로 하여 충전은 충전전원으로, 정밀충전은 조절전원으로 하여 전압안정도 유지가 양호한 것으로 나타났다. 이들 전원의 공진주파수는 동일하게 하였다. 그림 2는 SCPS전원과 PCPS전원을 병렬로 연결하고 충전전원과 조절전원의 충전동작의 전산모사 파형이다. 커패시터를 부하로 하여 전원을 충전하는 전원의 경우는 정전류원이 유리한 것으로 나타났고 직렬연결보다는 병렬로 사용한 것이 유리한 것으로 조사되었다.

3. 결 론

인버터를 이용한 고전압 전원장치를 설계하기 위해서는 전원장치의 용량 출력전압을 설정하는 파라메타의 설정이 중요하다. 여기서는 인버터를 이용하여 1.2 μF 의 정전용량을 갖는 부하 콘덴서에 16.67 ms 이내에 50 kV 평균출력 84 kW급의 고전압 전원의 설계단계에서 전기, 전자회로 시뮬레이션 tool인 PSIM과 IsSpice를 이용하여 전산모사를 실시하여 얻어진 결과를 전원장치설계에 반

영할 것이다. 특히 정전류원을 필요로 하는 고전압 인버터 전원의 핵심인 고주파변압기 권수비 결정시에 시뮬레이션 tool인 IsSpice를 사용하여 결과를 얻었다. 시스템의 전반적인 동작이나 긴 시간동안의 현상을 파악하는 데는 PSIM을 이용하였다. 대 출력 고전압 전원장치의 출력안정도를 $\leq 0.01\%$ 와 고효율($> 85\%$)을 유지하기 위한 설계로 각각의 정전류원을 병렬로 결합하는 형태가 유리한 것으로 조사되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Barry C. Pollard, R. M. Nelms, "Using the series-parallel resonant converter in capacitor charging applications", IEEE, 1992
- [2] Aaron C. Lippincott, Robert M. melms, "A capacitor-charging power supply using a series-resonant topology, constant on-time/variable frequency control, and zero-current switching", IEEE, 1991
- [3] Y. G. Son, S. D. Jang, J. S. Oh, M. H. Cho, "Study on the high power and high voltage 35 kW, 50 kV inverter power supply" The transactions of the korean institute of electrical engineers, Vol. 51, No.11, Society of electrical machinery & energy conversion systems B, pp628-634, November 2002
- [4] Y. G. Son, J. S. Oh, S. D. Jang, and M. H. Cho, "Development of Compact 50 kV, 10-kW Transformer for High Frequency Switch Mode Converter," Proc. of the KIEE 1998 Summer Annual Conference, Vol. F, pp2027-2029, Kyungju, Korea, July 20-22, 1998
- [5] J. S. Oh, S. D. Jang, Y. G. Son, "Development of a capacitor-charging power supply for a smart modulator", APAC'01, Beijing, China, 2001