

Full-bridge 고전압 인버터의 출력전압 정밀제어에 관한연구

손 윤규, 권 세진, 장 성덕, 서 재학, 오 중석
포항가속기 연구소, 포항공과대학교

Study on the high precision output of full-bridge high-voltage inverter

Y. G. Son, S. J. Kwon, S. D. Jang, J. H. Suh, J. S. Oh
PAL, POSTECH

Abstract - The PAL (Pohang Accelerator Laboratory) is persuading to construct a SASE-XFEL facility (PAL XFEL) that supplies coherent X-rays. The bright and stable electron beam is essential for the PAL XEL. The electron beams has to have an emittance of 1.0 mm-mrad, a peak current of 3 kA, and a low energy spread of 1.0 MeV. In order to provide reasonably stable SASE output, the RF stability of 0.02% rms is required for both RF phase and amplitude. This is a technologically challenging issue for PAL XFEL. An inverter technology is to be applied to charge the PFN of a new modulator. Therefore, a new inverter system should provide very stable charging performances. This paper presents the development of an ultra stable klystron-modulator with an inverter power supply.

상제어기와 de-Q'ing에 의해서 수행되고 있다. 현재의 시스템을 제 4세대 전원으로 활용하기 위해서는 아나로그 회로인 de-Q'ing회로를 디지털화하여 개량함으로써 필요한 조건에 대해 만족하게 제어가 가능해진다. 그림 1은 충전시스템으로 인버터 전원을 채택하고 있는 것을 보여 주고 있다. 인버터 전원장치는 높은 신로도와 지령충전이 가능하다.

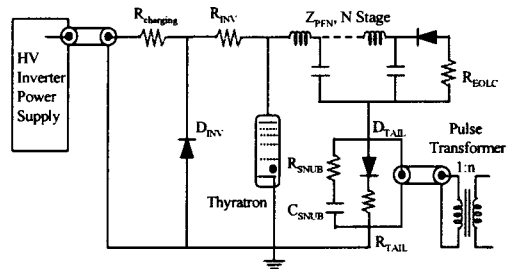


그림 1 : Modulator circuit with inverter power supplies.

1. 서 론

전자 빔 전송 RF증폭관 전원으로 사용하는 펄스 모듈레이터의 충전전원으로 CCPS(Capacitor Charging Power Supply)를 사용한다. 부하인 PFN(pulse forming network)콘덴서에 충전되는 전압의 양이 일정해야 펄스 평탄부의 전압의 크기가 일정하게 된다. 이 전원은 고전압적인 방식으로 승압변압기를 사용하여 2차 측에 정류용 다이오드를 삽입하여 직류전원으로 만든 다음 공진충전에 의한 입력전원의 두 배에 해당하는 전압으로 콘덴서에 충전하여 사용하고 있다. 최근의 추세는 반도체 소자의 발달로 스위칭모드 방법을 이용한 직렬공진형 인버터를 사용하여 고전압적인 방식에 비해 전원의 부피를 줄여 전반적으로 전원장치의 크기를 줄일 수 있는 이점이 있다. 이와 같이 전원장치의 부피를 줄이고자 하는 것이 세계적인 추세이다. 또한 콤팩트하면서 고효율의 출력전압의 안정도를 요구하고 있다.^{[1][2][3]} 고에너지의 양질의 빔 전류를 필요로 하는 포항 방사광 가속기의 제 4세대에 적용 가능한 전원으로 출력전압의 안정도($\leq 0.01\%$)와 고효율($> 85\%$)을 목표로 설계 중에 있다. H-bridge 방식의 영 전류 스위칭기술을 이용한 H-bridge 직렬공진방식의 컨버터로 구성하여 출력안정도를 높이기 위해 각각의 독립된 두 개의 전원에 대한 회로 토폴로지 분석의 결과와 시뮬레이션에 대한 결과를 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 인버터형 충전시스템

포항 가속기 연구소의 선형가속기에 적용된 모듈레이터의 전원충전장치는 고전압적인 방식을 사용하고 있다. 선형가속기의 충전전압 안정도는 입력전압을 조절하는 위

또한, 단락회로에 적용가능하고 크기도 소형이다. 또 다른 특징으로는 간단한 보수와 용이한 확장성과 수정이 가능한 제어의 인터페이스 기능을 들 수가 있다. 시스템에서 공간을 많이 차지하는 de-Q'ing시스템과 EOLC thyrite가 필요하지 않기 때문에 부피를 줄여 콤팩트하게 제작이 가능하다. 이러한 특징들이 X-linac가속기에서 요구하는 사항과 잘 일치되는 부분이다.

2.1.1 인버터 시스템

고전압 인버터 전원에서 출력전압의 안정도를 유지하기 위해서는 피드백전압과 기준전압의 온도에 따른 변화율은 0.5 %이내의 부품들로 구성되어져야 제어가 가능해진다. 전압 피드백 신호로 사용되는 고압저항의 경우는 100 ppm/°C의 온도계수를 가지고 있어야 한다. 시스템을 켜고 1시간이상 준비시간을 가진 다음에 0.2 %, 장시간에서는 0.1 %의 범위를 가져야 한다. 결론적으로 PAL XFEL에 적용 가능한 전원으로 만족하기 위해서는 현재 사용하는 인버터 전원의 출력 안정도를 개선해야 한다. XFEL에 적용 가능한 인버터 전원방식이 많이 있다. 고전압적인 직렬 공진형 인버터의 주파수 제어방식은 단순하고 오래된 방식으로 PWM(펄스폭 변조) 인버터의 직렬공진형 인버터는 한 주기 동안 충전하여 래플레이션 하는 정도가 대략 10 %이다. 그림 2는 콘덴서 충전용 전원의 충전주기를 보여주고 있다. 상업용으로 판매되는 H-bridge회로로 구성된 인버터 전원의 충전 끝부분에서는 전압안정도는 대략 2 ~ 3 %정도가 되는 것으로 확인되었다.

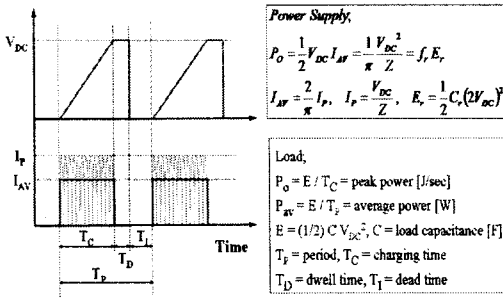


그림 2 Typical CCPS charging profile definitions.

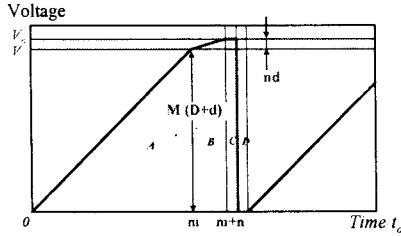


그림 3 Charging schedule with parallel operation.

$$(m+n) t_o = T_c, \quad m(D+d) + n d = V_o, \quad n d = j D$$

$$m+n = a, \quad m^2 - a m + (a+b) j = 0$$

t_o : inverter switching period

T_c : charging time

$d = I_f t_o / C$: fine charging step

$D = (I_c + I_f) t_o / C$: coarse charging step

C : capacitance

I_f : charging current of a fine inverter

I_c : charging current of a coarse inverter

$a = T_c / t_o$

$\beta = V_o / d$

그림 3은 H-bridge인버터의 충전주기를 개선한 것을 보여주고 있다. 한 주기 동안의 충전주기를 2번 내지 3번 정도로 나누어서 레플리케이션을 개량할 수 있다. 정밀급의 전원안정도를 유지하기 위해서는 고전압 고주파변압기 2 차측에서 보아 병렬로 연결된 형태의 병렬공진 인버터로 된다. 충전기간 동안은 메인전원과(Coarse) 정밀전원(Fine)이 동작을 하고 목표하는 전압까지의 95%에 해당하는 전압까지는 메인전원이 동작을 하며 그 이후의 충전은 정밀 인버터가 담당하도록 제어기를 구성하였다. 각각의 인버터는 독립된 위상제어로서 일정한 스위칭주파수를 가지고 있다. 충전은 위상 전이와 스위칭 사이클 사이에서 전류의 환원과 동기된 신호에 의해서 수행을 하게 된다. 설계된 전원장치의 기술적인 부분을 검사하고, 이해하기 위해 PFN정전용량 0.88 μF 의 150 MW 모듈레이터에서 시험하였다. 두개의 인버터의 충전용량은 33 kJ/s이다. 정밀 충전인버터로 충전용량은 4.61 kJ/s를 사용하였다. 그림 4는 전산모사에 사용된 등가회로이다. 왼쪽이 IGBT 게이트제어회로이고 오른쪽은 인버터 전원의 파워부분과 모듈레이터의 PFN, 펄스변압기, 부하인클라이스트론이다. 콘덴서 충전 전원장치의 충전주기는 충전시간(charging time)과 유지시간(dwell time) 불감시간(dead time)을 합한 시간이다. 펄스 반복율을 빠르게 하기 위해서는 충전시간이 빨라야 한다. 동일한 부하 콘덴서에 대해서 충전시간을 빠르게 하는 방법으로는 콘덴서 충전전원의 용량이 커야 하며 이는 출력되는 전원의 출력전류도 커지게 된다. 충전전류를 크게 하기 위해서 콘덴서 충전전원을 여러 대 병렬로 접속하여 사용한다. 전

원장치의 대수에 비례해서 충전시간의 상승 기울기는 가파르게 된다. 그림 5는 전산모사의 결과로서 콘덴서에 충전되는 전원의 중단부분을 확대한 것을 보여 주고 있다.

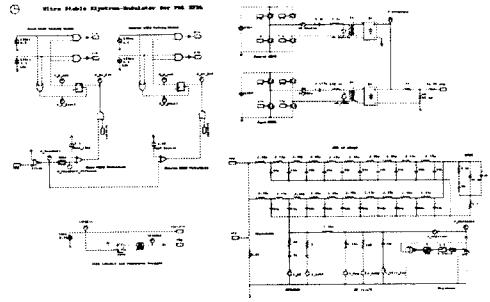


그림 4 Simulation circuit of a XFEL modulator.

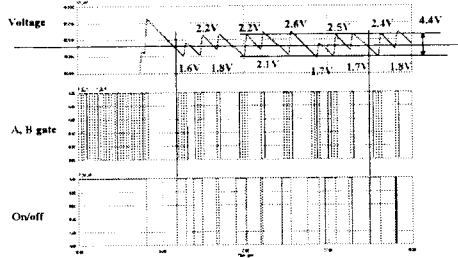


그림 5 Simulated charging stability.

2.2 전원장치 설계

Full bridge 컨버터를 이용한 출력전압 50 kV, 평균 출력 15 kW급의 고전압전원으로 설계하고 공진회로에 직렬로 삽입된 직렬 인덕터와 공진 콘덴서의 값을 계산하고 시뮬레이션을 하였다. 콘덴서 전원충전용 전원으로서는 전력단위인 J/sec로 최대전력과 평균전력 2가지로 표현할 수 있다. 표 1은 CPS와 FPS인버터의 설계파라미터이다. 공진회로의 공진 주파수 f , 공진최대전류 I_{pk} , 공진 임피던스 Z , 스위칭 시간 t_{on} , 최대 스위칭 주파수 f_{max} 는 다음과 같다.^{[4][5]}

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

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

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

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

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

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

최대 공칭정격은 충전 시간을 계산할 때 사용된다. 그리고 평균전력은 최대 반복율 또는 충전전압을 결정하는데 사용된다. 그림 6은 콘덴서의 충전과 방전을 주기적으로 하는 펄스시스템의 등가회로를 보여주고 있다. (1)에서 (6)번 공식을 이용하여 부하에 충전되는 전원장치의 정격과 충전시간을 계산하게 될 것이다.

충전시의 최대전류 I_{max} 와 전원장치의 평균출력 P_{av} 는 다음 식과 같다.

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

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

CPS : Coarse power supply, FPS : Fine power supply

2.2.1 직렬공진회로 설계

전원은 정전압 원과 정전류 원으로 구분할 수 있다. 정전압원은 출력임피던스가 작고 출력전류가 낮은 특징을 가지고 있다. 그에 비해 정전류원은 출력임피던스가 ∞ 로 출력되는 전류는 일정한 값을 갖는다. 본 시스템은 정전류원을 병렬로 연결한 등가회로를 그림 6에 보여주고 있다. 메인충전전원과 정밀충전원의 공진주파수는 동일하게 하였으며, 각각 독립된 스위칭 주파수 제어기를 갖고 있다. 부하에 충전되는 전력은 메인충전전원과 정밀충전전원의 용량을 합한 양은 직렬공진으로 부하에 전달되는 에너지와 같다. 인버터 전원의 용량을 결정하는 직렬공진회로의 설계는 식(9)과 (10)를 이용하여 구할 수 있다.^[6]

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

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

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

표 1. Inverter design parameter.

Design Parameter	Coarse	Fine
Output Voltage [kV]	50	50
Resonant Frequency [kHz]	41.67	37.7
Peak Charging Rate [kJ/s]	33	4.61
Primary AC Voltage [V]	480	480
Duty Max.	0.8	0.8
Load Capacitor [μF]	0.88	0.88
Filtered Primary DC Voltage [V]	648	648
Resonant Impedance [Ω]	2.935	25.5
Resonant Inductance [μH]	11.2	108
Resonant Capacitance [μF]	0.3	0.165
Max. Power [kW]	27.6	3.69
Output Average Current [A]	1.1	0.205
Peak Switching Current [A]	224	25.33
Turn Ratio	87	87
Maximum Ambient Operating Temp [$^{\circ}C$]	60	60
Efficiency of the Power Supply [%]	<90	<90

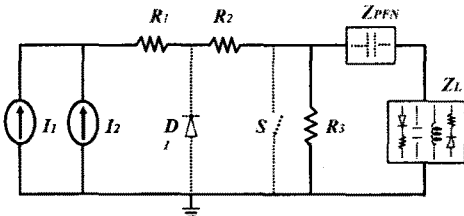


그림 6 Equivalent charging circuit.

3. 결 론

H-bridge 토폴리지를 이용한 직렬공진형 인버터를 이용한 고전압 전원장치를 두 단계 나누어 충전되도록 설계하였다. 설계된 전원장치는 0.88 μF 의 정전용량을 갖는

150 MW 모듈레이터에서 PFN콘덴서에 6.47 ms이내에 10 kV 평균출력 30 kW로 전원의 출력안정도를 측정하는 시험을 실시하였다. 출력전압의 안정도는 직렬공진형 인버터가 공진주파수동안 콘덴서에 한주기 동안 채우는 양이 출력안정도를 결정하게 된다. 측정된 인버터 전원장치의 출력안정도는 ± 0.06 %까지 측정되었다(그림 7참조). 설계단계에서 전기, 전자회로 시뮬레이션 tool인 PSiM과 IsSpice를 이용하여 전산모사를 실시하여 얻어진 결과를 전원장치설계에 반영하였다. 대출력 고전압 전원장치의 출력안정도를 ≤ 0.01 %와 고효율(> 85 %)을 유지하기 위한 설계와 측정을 수행해 나갈 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] Y. G. Son S. D. Jang, J. S. Oh, "Design of a High-Voltage High-Power Resonant Inverter Power Supply using IsSpice," The Korean institute of power electronics, Vol. pp159-164, Konkuk University, Seoul, Korea, June 14, 2002
- [3] 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
- [4] Barry C. Pollard, R. M. Nelms, "Using the series-parallel resonant converter in capacitor charging applications", IEEE, 권호, pp245-252, 1992
- [5] 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, 권호, pp438-447, 1991
- [6] 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

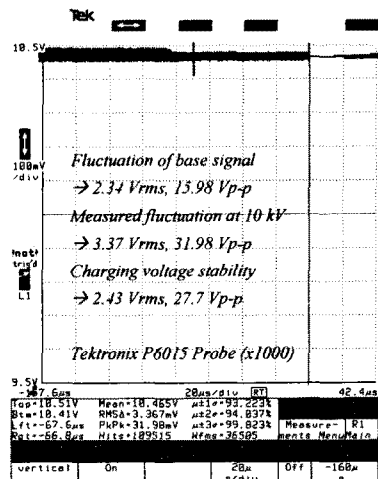


그림 7 Measured charging stability.