'94 대한전기학회 하계학술대회 논문집(1994, 7, 21~ 23)

200MW MODULATOR의 출력안정화를 위한 DE-Q'ING SYSTEM에 관한연구

손 윤규*, 오 종석, 조 무현, 남궁 원
선형가속기 개발단, 포항 가속기연구소, 포항공과대학교

Study on the De-Q'ing System for the Output Voltage Stabilization of a 200MW Modulator

Y.K. SON*, J.S. OH, M.H CHO, W. NAMKUNG
Linac Division, Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology

Abstract

Modulators installed in PLS(Pohang Light Source) Linac are composed of a DC high voltage section, a charging section and a discharging section. PFN is charged by a resonant charging mechanism, and discharged by a switching device through the primary of the pulse transformer connected to a load. Charged PFN voltage must be well regulated to obtain stable output pulse voltage at the load. For this purpose, DCHV is controlled by a SCR controller with feedback signal, and PFN voltage is regulated by a De-Q'ing circuit. The full power operation test shows the pulse voltage regulation within ±0.13% with SCR feedback control alone, and within ±0.08% together with De-Q'ing. This paper describes the design concept and operational characteristics of the De-Q'ing circuit.

1) 서론

포항가속기 연구소에서 건설한 선형가속기는 2GeV의 전자빔을 얻기 위해 200MW고출력의 모듈레이터 11대와 80MW클라이스트론 10대, 65MW클라이스트론 1대가 설치되어 있다. 모듈레이터는 클라이스트론에 전원을 공급하는 장치로서 운전에 필요한 마이크로웨이브 펄스폭 4.1μsec, 80MW 최대첨두출력을 얻기위해서는 400kV, 500A ESW (Equivalent Square Wave) 7.5μsec의 펄스형 BEAM VOLTAGE가 필요하다. 포항선형가속기의 설계요구조건에 따라(표 1.참조) 빔전압은 ±0.5%의 안정도가 유지되어야 한다. 특히 클라이스트론의 출력 안정화를 위해서는

표 1. 모듈레이터의 주요 매개변수
Table 1. MAIN PARAMETERS OF MODULATOR

MAIN PARAMETERS OF MODULATOR	PLS SPEC	TESTED VALUE
PEAK POWER (MW)	200	188
AVERAGE POWER (kW)	200	46
PEAK BEAM VOLTAGE (kV)	400	399
PEAK BEAM CURRENT (A)	500	472
PULSE REPETITION RATE (Hz)	120	30
PULSE FLAT TOP (μs)*(1)	≥4.3	4.7
PULSE FLATNESS (%)	<±0.5	<±0.5
PFN IMPEDANCE (OHM)	2.8	2.8
PULSE RISE TIME (μs)*(2)	0.8-1.0	0.8-1.0
PULSE FALL TIME (μs)*(2)	1.5-2.0	1.5-2.0
CHARGING TIME (ms)	< 8	5.85

*(1) Time width with beam voltage ripple <±0.5%
*(2) From 10% to 90% of the flat-top beam voltage

모듈레이터를 구성하고있는 전원콘트롤장치인 SCR 3φ위상제어및 FEEDBACK 콘트롤러를 이용하여 AC-480V의 입력변동에 의한 DC고전압출력을 ± 1.0%로 제어하고 De-Q'ing 회로를 이용하여 PFN(PULSE FORMING NETWORK)충전전압을 ± 0.5%로 제어되도록 설계하였다. 본 논문에서는 De-Q'ing회로를 이용한 모듈레이터의 펄스출력전압 안정화의 원리를 기술하고 설계된 회로의 실험결과를 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다. 표 1.은 모듈레이터의 설계사양및 특성시험결과를 요약한것이다.

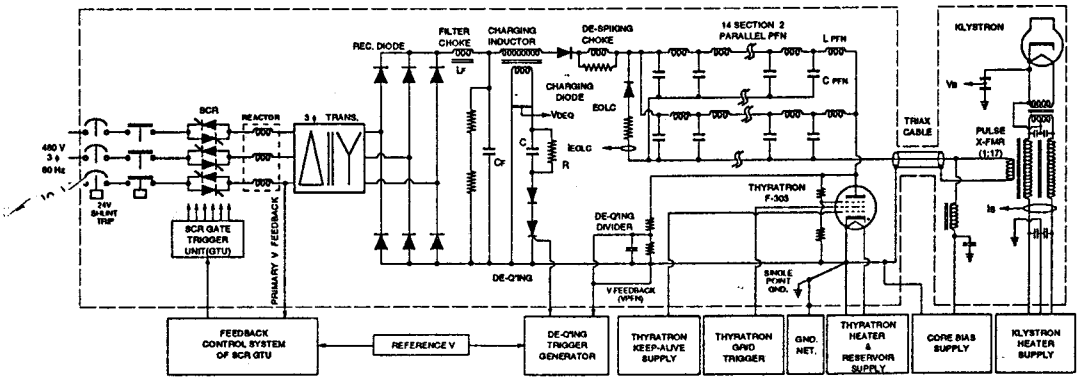


그림 1. MODULATOR 전체 회로도.
Fig 1. Schematic circuit diagram of the modulator.

2) 모듈레이터의 구성과 사양

모듈레이터는[1] 고전압 전원부, 충전부, 방전부로 구성 되어 있으며 회로의 계략도는 그림 1과 같다. 고전압 전원공급장치는 3상변압기, 정류기, LC필터로 되어있으며 3상전원을 20VAC에서 480VAC까지 SCR (1.6kV,700Arms, 400Aavg, SKKE400-16E : SEMIKRON사) 제어하고, 3상 변압기는 승압용으로 (440Vrms,19kVrms,12Arms, 98%eff. 320KVA) △-Y, △-△ 결선을 사용하고 있다. 정류기는 일반다이오드 (역첨두전압 1.6kV,26A, 48개 직렬)6세트를 사용하여 3상 전파정류를 하고 있으며, LC필터는 5H의 리액터와 14.1μF(4.7μF, 3개,병렬,30kV)의 커패시터를 사용하고 있다.

충전부는 공진충전방식을 사용하고 있으며 충전용 인덕터, 다이오드, DESPIKING인덕터, PFN(PULSE FORMING NETWORK)커패시터, De-Q'ing으로 구성 되어있다. 충전용 인덕터(2.4H/3.84mH)는 PFN커패시터에 공진 충전되도록 설계되어 있다. 인덕터 2차(25:1의 권선비)측에는 PFN커패시터에 충전되는 전압을 일정하게 하기위하여 De-Q'ing 회로가 설치되어있다. 충전용 다이오드(1.6kV, 71A, 80개직렬, 스너버 :100Ω, 0.1μF)는 충전시에 역전류가 고전압 전원장치로 흐르는 것을 방지하며 스위칭시 전압,전류의 큰변화에 대해 충전부를 보호하기 위해 DESPIKING용 14mH의 인덕터가 2KΩ 의 저항과 병렬연결되어 설치되어 있다.

방전부는 커패시터와 가변인덕터로 구성된 PFN, 싸이라트론스위치 튜브, EOLC(END OF LINE CLIPPER),펄스변압기와 2차측에 부하로 사용하는 크라이스트론으로 구성된다. PFN은 2.8Ω의 임피이던스를 갖으며 펄스변압기의 1차측에서 본 부하임피이던스와 같도록 결정되어지며 펄스폭은 7.5μsec 를 얻을 수 있다. 상승시간은 약 0.8μsec가 되고 FLAT-TOP펄스폭은 최소 4.3μsec이상을 갖는다. PFN은 LC 14세트를 병렬로 연결한 형태로 계산한 값은 각각 4.5μH, 1.4μF를 갖는다. PFN의 각 인덕터는 약 1.0μH-4.5μH의 가변형으로 되어있어 펄스의 파형및 FLAT-TOP RIPPLE을 결정한다. 싸이라트론 스위칭튜브는 ITT F-303 튜브를 사용하고 있으며 PFN커패시터에 충전된 전압을 펄스변압기에 전달하여 원하는 펄스를 얻는다. 펄스변압기는 1:17의 비율로 2차측에 약 800Ω 의 크라이스트론 부하를 갖으며 크라이스트론은 TOSHIBA E-3712튜브를 사용하고 있다. 펄스변압기의 2차는 최대 400kV, 500A의 펄스를 갖는다. 그리고 EOLC는 PFN커패시터의 부하단에서 가장먼쪽에 연결되어 PFN임피이던스와 펄스변압기의 임피이던스가 맞지 않을 경우 싸이라트론튜브와 PFN커패시터에 발생하는 역방향 전압의 상한치를 제한해 주기 위한 회로로서 다이오드(역첨두전압 1.6kV, 평균전류 71A, 80개)와 부성저항을 갖는 싸이라이트(250VDC,10W, 24개 직.병렬)와 무유도저항(10Ω, 4개)으로 구성되어 있다.

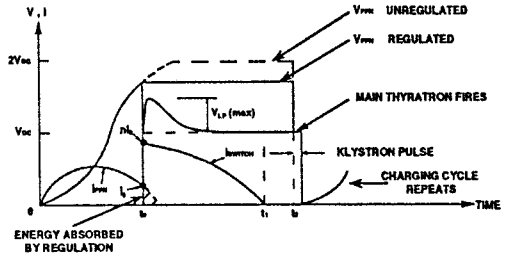
3) De-Q'ing회로의 동작

입력 DC전압 V_{DC}로 공진충전에 의하여 PFN에 충전되는 전압을 V_{PFN}이라하면,

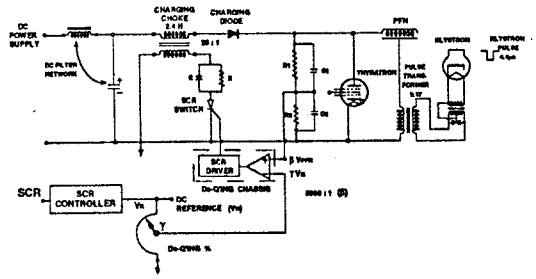
$$V_{PFN} = \frac{1}{C_{PFN}} \int_0^{t_c} i_{PFN} dt = V_{DC}(1-\cos\omega t) = 2\ V_{DC} \quad - ①$$

$$i_{PFN} = \frac{V_{DC}}{\omega L_P} \sin\omega t \quad - ②$$

$$t_c = \frac{\pi}{\omega} = \pi\sqrt{L_c\, C_{PFN}} \quad - ③$$



(a)



(b)

그림 2. PFN 충전전압과 De-Q'ing 전압, 전류파형(a) 및 De-Q'ing 회로도(b).

Fig 2. PFN charaing and regulation waveforms(a), and the De-Q'ing circuit diagram (b).

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_c\, C_{PFN}}} \quad - ④$$

$$V_{LP} = -L_c \frac{di_{PFN}}{dt} = -V_{DC} \cos\ \omega t \quad - ⑤$$

단,

ω는 공진충전 주파수이고, L_c는 충전인덕터 1차측 인덕턴스, C_{PFN}은 PFN의 합성커패시턴스 값이고, V_{LP}는 충전인덕터 1차측 양단에 걸리는 전압이다.

식①에서와 같이 공진충전시 충전전압은 입력전압의 2배가 되게된다.[2],[3] PFN에 걸린전압이 일정하게 되기 위해서는 충전된 전압이 일정하면 된다. 위의 ③식에 의해 공진 충전되는 시간은 항상 동일하며, PFN에 충전되는 전압은 공급하는 전원의 전압이 일정할 경우만 일정하게 되므로 공진충전시 De-Q'ing회로를 동작시켜 충전전압을 일정하게 유지시킨다. 즉, 싸이라트론 스위치가 OFF되면 PFN커패시터는 충전을 하게 되는데 이때 충전인덕터 2차측의 다이오드와 SCR스위치는 역바이어스가 되어 1차측의 권선은 인덕터와 같이 에너지를 축적하고 PFN이 충전하고자하는 전압에 도달되었을 때 SCR스위치를 ON하여 2차측 권선에 유기된 전압을 R과C를 통하여 방전을 시키고 1차측 권선에 흐르는 전류는 감쇄하는 방향으로 흐르려는 성질 때문에 충전다이오드가 역바이어스가 되므로 충전을 완료한 상태를 유지한다. 이와 같이하여 PFN에 충전된 전압은 일정하게 유지된다.

120PPS(최대펄스 동작주파수)로 운전하고자 할시, De-Q'ing하고자하는 시간 t_0가 결정되어지면(그림 2(a)참조) 싸이라트론 스위칭시간 t_2 이전까지 충전인덕터 2차측에 유기된 전압을 R과C를 통해서 소멸시켜야 한다. 에너지가 소멸되는 시간을 t_1 이라하면, 이 시간을 결정하는 주요한 변수는 R과C 이다. 현재 이 시스템에는 R:3.6Ω(0.45Ω×8개 직렬, 1.8kW/개) C:50μF(25μF 2개 병렬, 660VAC)로 구성되어 있으며 충/방전 시정수는 2.7ms이다.

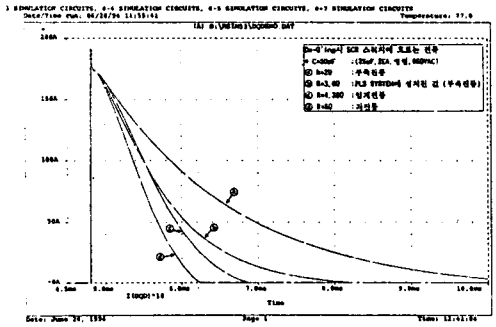


그림 3. SCR 스위칭 전류파형의 시뮬레이션 결과.
Fig 3. Computer simulation results of the SCR switching current of the De-Q'ing circuit.

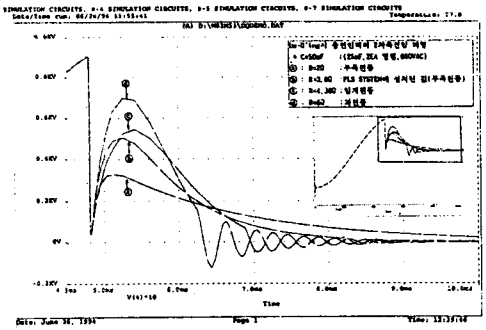
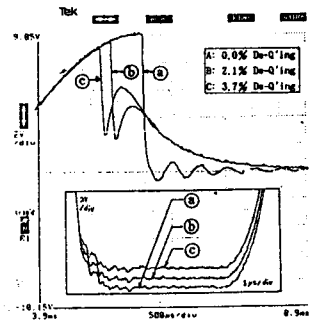
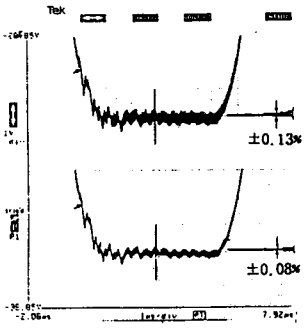


그림 4. 충전인덕터 2차측 전압파형의 시뮬레이션 결과.
FIg 4. Waveforms of a charging inductor secondary voltage (computer simulation result).



(a) 500μS/DIV, 1μS/DIV



(b) 1μS/DIV

그림 5.(a) De-Q'ing 퍼센트에 따른 충전인덕터 2차전압 파형과 그때의 빔전압(inset box).
(b) De-Q'ing 동작시 빔전압의 안정도 (>1시간 연속, 누적측정결과).

Fig 5.(a) Charging inductor secondary voltage and beam voltage variation at the different De-Q'ing percentage.
(b) Accumulated beam voltage stability with De-Q'ing (>1 Hr continuous accumulation of the data using Tektronix DSA-602A).

4. 시뮬레이션과 실험결과

컴퓨터 시뮬레이션 결과(그림 3.),(그림 4.)와 실제 회로의 동작결과(그림 5. (a))를 비교해보면, De-Q'ing에 필요한 부품이 설계기준에 적합한 가를 알수 있다. 커패시터는 컴퓨터 시뮬레이션및 실험결과 약50μF(25μF 2개 병렬)정도가 적당한 값임을 얻었고, 저항은 De-Q'ing시 커패시터에 충전된 에너지를 소멸시키는 용도로서 가변값으로 놓고 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 3Ω으로 선정한 다음 실제실험에 있어서 ±2Ω을 가변하여 현재의 값(3.6Ω)으로 선정하였다. De-Q'ing 동작에 의한 PFN전압제어 정도는 식⑥과 같다

$$\%regulation = \frac{V_{PFN}(unreg) - V_{PFN}(reg)}{V_{PFN}(unreg)} \times 100 \quad -⑥$$

식 ⑥에 의한 약 5%의 De-Q'ing을 충전전압(V_{PFN}) 50kV에서 할 경우 De-Q'ing전류의 첨두최대치는 19A이며 30PPS로 동작할 경우 최대 2.5KW의 평균 전력이 출력 빔전압을 안정화하기 위해 저항에서 소모되는 전력이다.

그림 5.(a)는 De-Q'ing시의 전압을 측정한 그래프다. 저항 디바이더 100:1(2MegΩ 2W, 20KΩ 2W)로 측정된 전압파형으로 첨두최대치가 800V이다.

그림 5.(b)는 De-Q'ing 동작시 출력 빔전압의 안정도를 보이고 있으며, De-Q'ing 퍼센트지에 따른 >1시간 연속 누적된 데이타 측정 결과이다.

5. 결론

200MW 모듈레이터의 출력안정화를 위한 De-Q'ing 회로의 실험결과 빔전압 399-kV의 운전에서 전압안정도 ±0.08% (±1σ범위)를 얻었다. 향후 개선책으로는 De-Q'ing시 소모되는 에너지를 회수하여 입력측으로 되돌려 에너지 효율을 높이는 ENERGY RECOVERY회로에 대한 연구를 수행할 예정이다.

6. 참고문헌

(1) 박 성수 *et al.*,150MW 펄스MODULATOR의 설계및 동작특성, 대한전기학회1992. 하계학술대회논문집(B)p928-930
(2) R.B. Neal, ed, The Stanford Two-mile Accelerator, Q.A. Benjamin, New York, 1968.
(3) J.S. Oh *et al.*, KPS Bulletine, Vol. 11 No.2 1993, p-74