

Modulator의 출력안정도 향상을 위한 DeQing Controller 개발

김상희, 박성수, 황정연, 한영진, 남상훈, 오종석
포항공대 포항가속기연구소

The development of a deQing controller to improve the output of a modulator

S. H. Kim, S. S. Park, J. Y Hwang, S. H. Nam, J. S. Oh

ABSTRACT

포항가속기연구소가 추진 중인 제4세대 방사광가속기에는 100 PPM급의 클라이스트론 펄스전압 안정도가 요구된다. 이러한 안정도는 PFN(pulse forming network)에 충전되는 전압을 얼마나 정밀하게 제어하는가에 따라서 결정된다. PFN의 최종 운전 전압은 deQing circuit에 triggering되는 시점에 따라서 결정된다. DeQing trigger system은 PFN의 충전전압과 기준 전압을 비교하여 충전전압이 기준전압보다 커지는 시점에서 charging choke(충전 쇼크)의 2차에 구성된 deQing 회로의 SCR를 트리거 시켜서 충전 쇼크 1차와 2차의 권선비율이 25:1 인 충전 쇼크의 2차를 단락시켜 1차에 흐르는 전류를 2차로 빼주어서 PFN 커패시터에 더 이상 충전되지 않게 하는 구조로 되어있다. DeQing circuit에 triggering되는 시점을 정밀하게 제어하기 위하여 PFN 충전전압을 미분하여 그 출력전압에 비례하여 트리거 출력을 지연시키는 기능과 analog 신호를 digital 신호로 변환하는 기능을 사용하였다. 이 논문에서는 deQing 시스템에 관련된 회로 및 시험결과에 대하여 설명하고자 한다.

1. 서론

현재 선형가속기에서 운전 중인 모듈레이터는 커패시턴스-인덕턴스 네트워크(pulse forming network)로 구성되어 있기 때문에 “line type modulator”라고 부른다. 모듈레이터의 안정도는 PFN에 충전되는 충전전압의 변동폭에 따라 직접적으로 영향을 받는다. 그러므로 PFN에 충전되는 충전전압의 변동폭을 작게하는 것이 필수적이다. 충전전압의 변동폭을 작게하는 방법으로 deQing 회로를 사용하는 것이다. DeQing 시스템은 PFN 충전 전압을 안정화시키는데 사용되는 전통적인 방식이다^[1]. PFN의 최종운전 전압은 deQing circuit에 triggering되는 시점에 따라서 결정된다. DeQing trigger system은 PFN의 충전전압과 기준전압을 비교하여 충전전압이 기준전압보다 커지는 시점에서 charging choke(충전 쇼크)의 2차에 구성된 deQing 회로의 SCR를 트리거 시켜서 충전 쇼크의 2차를 단락시켜 충전 쇼크의 1차에 흐르는 전류를 2차로 빼주어서 PFN 커패시터에 더 이상 충전되지 않게 하는 구조로 되어있다. DeQing 시스템은 다음 2가지 사항을 만족하여야만 한다. (1) DeQing 기간 동안 충전인덕터의 1차측 최대전압이 PFN 충전 전압보다 적어야 된다. (2) 충전인덕터의 2차측 에너지는 다음 충전이 시작되기 전에 deQing에 의하여 제거되어야 한다.

2. 본론

2. 1 DeQing 회로

그림 1은 deQing을 위한 싸이리스터의 블록다이어그램이다. PFN 전압의 크기는 충전 쇼크 2차측에 연결된 deQing 회로에 의해 제어된다. DeQing 전압의 범위는 DC source 전압의 약 4~5%이다. 그림 1의 deQing용 싸이리스터 블록다이어그램의 구성도를 보면, 충전 쇼크, 싸이리스터, 에너지 저장 커패시터(50 μ F), 에너지 방전용 저항 3.6 Ω 과 싸이리스터가 turn on/off시 발생하는 노이즈제거용 필터회로로 구성되어있다.

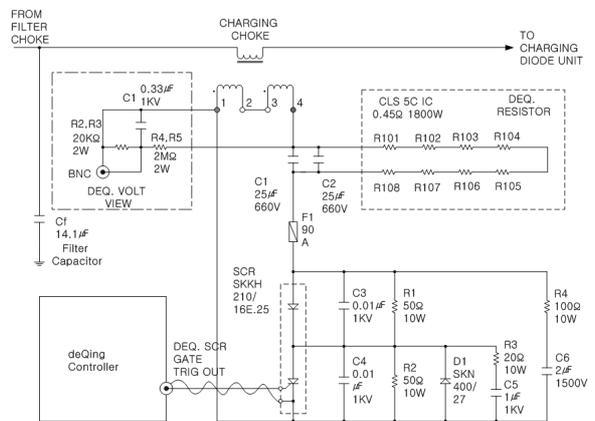


그림 1. DeQing용 싸이리스터 블록다이어그램

2. 2 DeQing Controller 회로 및 기능

그림 2와 3에서 deQing controller 사진과 블록다이어그램을 보여준다. DeQing controller의 구성요소들을 살펴보면, PFN에 충전된 전압을 10,000:1 비율로 정밀하게 분압하는 고전압 디바이더(high voltage divider), PFN의 전압과 deQing controller에서 만들어진 기준전압을 비교하는 비교기(OP-Amp), PFN 전압을 미분시키는 미분회로, 미분된 전압의 최대치를 샘플홀드하는 회로, 샘플홀드된 값을 디지털로 바꾸어주는 ADC 회로, 디지털 값의 크기에 따라 트리거 지연을 제어하는 회로, 기준 전압의 값과 deQing의 상태를 표시해주는 LCD로 구성되어 있다.



그림 2 DeQing Controller 사진

고전압 디바이더는 PFN에 충전되는 전압을 정확하게 측정하여야 하기 때문에 매우 정밀한 고전압 프로브를 사용하여야 한다. 사용된 고전압 프로브의 사양은 0.01% DC/ 5 MHz bandwidth, 60 kV DC 이다. HV divider에서 10,000:1 비율로 분압된 전압이 미분회로에 공급된다. 미분된 전압은 OP-Amp를 거쳐 signal 증폭을 시킨 다음 샘플홀드 IC에 공급한다. 미분화된 충전파형의 최대점(변곡점)에서 샘플홀드를 실시한다. 차동증폭회로에 샘플홀드된 signal과 reference voltage가 공급된다. 차동증폭기에서 출력된 signal은 다시 증폭회로를 거친 다음 ADC IC에 공급하게 된다. 즉, analog signal이 digital signal로 바뀌게 되는 것이다. 이 digital signal은 3개의 4 bits 용 down counter에 보내지게 된다. 여기의 down counter는 12개의 channel을 모두 사용하지 않고 8개 channel만 사용하여 8 bits만 사용하여 최대 $2^8 = 512$ bits까지 counter하게 된다. 이 디지털 정보(1 ~ 512 bits)는 deQing trigger delay에 사용하게 되는 시간지연으로 $-5(V) \sim +5(V)$ 가 되며, 이 값에 대응되는 값 $128 \sim 0.25 \mu s$ 로 바뀌게 되는 것이다.

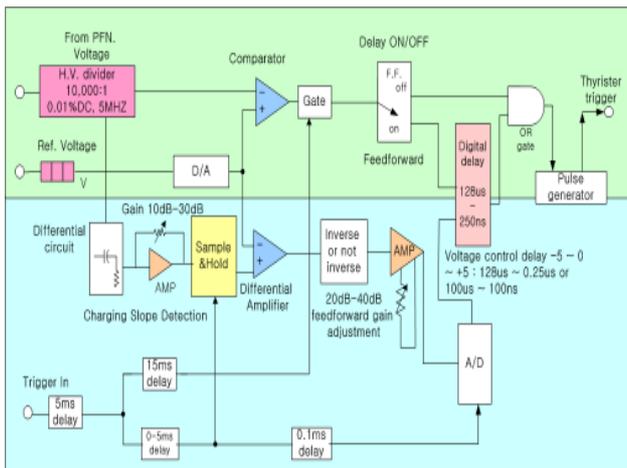


그림 3 DeQing controller의 블록다이어그램

2. 3 측정 장비

DeQing controller를 선형가속기의 Test Linac 150 MW 모듈레이터에 장착하여 시험을 하였다. DeQing시 모듈레이터의 PFN 전압은 35 kV, 펄스 폭은 6 μs , 주파수는 30 Hz, 고전압 디바이더의 비율은 10,000:1 이며 PFN의 충전 전압을 측정하기 위하여 바로 옆에 설치하

였다. 사용한 고전압 디바이더는 DC accuracy가 0.01% ROSS사의 VD60-6.2Y-BD-KC-UJGA-F이며, 측정 스코프는 Tektronics DPO 7104 model이다. 그러나 우리가 측정하고자 하는 안정도는 0.02%이므로 스코프로는 측정이 불가능하였다. 그 이유는 스코프의 DC gain accuracy는 1%이다. 이와 더불어 스코프의 ADC동작 원리에 대해서도 측정시 참고하여야 한다. 스코프는 full dynamic range에 대한 입력 신호를 8 bits로 ADC 한다.

우리가 측정하고자하는 PFN의 전압은 10,000:1로 분압 되어 5 V 범위에서 측정하게 된다. 이 전압을 측정하기 위하여 스코프의 vertical division을 100 mV로 설정하게 되고 이때 full dynamic range는 $100 \text{ mV} \times 10 = 1 \text{ V}$ 가 된다. 이 1 V 범위를 8 bits로 ADC 할 경우 해상도는 약 4 mV이다. 원하는 측정 정확도가 0.01% 이므로 5 V 신호에 대하여 0.5 mV의 정밀도를 요구받게 되므로 스코프로 측정이 불가능하여 LeCroy 제품의 differential amplifier인 DA1855A 측정 장비로 시험 결과를 측정하였다. 이 측정장비의 경우 DC accuracy의 범위가 0.01% 이므로 우리가 원하는 사양의 신호를 측정할 수 있었다. 그림 4는 differential amplifier인 DA1855A 측정 장비를 사용하여 Tektronics DPO 7104 스코프로 deQing시 PFN 전압의 안정도를 측정한 사진이다.

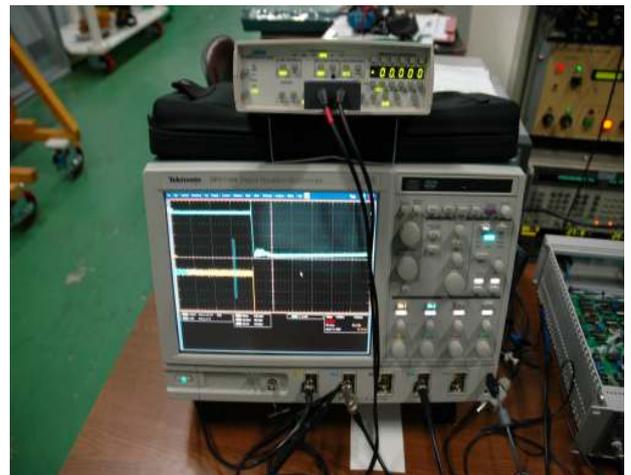


그림 4 측정 장비의 사진

2. 4 시험 결과

PFN에 충전되는 에너지가 dV/dt 에 상관없이 항상 변화하지 않고 일정하다면, deQing 회로를 사용하지 않아도 될 것이다. 그러나 모듈레이터에 공급되는 AC 전원의 값이 항상 일정하지 않고 변하기 때문에 dV/dt 의 변동이 발생하는 것이다. "Line type modulator"의 경우는 deQing 회로를 사용하여 출력의 안정화에 기여 할 수 있는 것이다.

그림 5의 C4에서 deQing controller에서 출력되어 나온 trigger 파형을 보여준다. 이 트리거 출력은 charging choke(충전 쇼크)의 2차에 구성된 deQing 회로의 SCR를 트리거 시켜주어서 충전 쇼크 1차와 2차의 권선비율이 25:1인 충전 쇼크의 2차를 단락시켜 1차에 흐르는 전류를 2차로 빼주어서 PFN 커패시터에 더 이상 충전되지

않게 해준다. C4의 트리거 파형을 보면 PFN의 전압이 dV/dt에 의해 약 195 μ s 정도의 jitter를 발생시키고 있으며, deQing controller는 이 jitter의 변화를 따라 가면서 트리거 출력을 발생시킨다. 즉, PFN의 충전전압과 기준전압을 비교한 전압과 PFN 충전전압을 미분하여 그 출력전압인 analog 신호를 digital 신호로 변환하여 트리거 출력을 지연시키는 기능을 사용하여 deQing circuit에 triggering되는 시점을 정밀하게 제어함으로써 deQing의 안정도를 높이고 있다.

그림 6은 deQing을 하지 않은 상태에서 PFN 전압 파형을 측정하는 것이며, 그림 7은 deQing을 실시한 상태에서 PFN 전압 파형을 측정하는 것이다. LeCroy DA1885A의 differential amplifier와 DPO7104 scope의 bandwidth를 20 MHz 상태로 놓고 PFN 전압 파형을 측정하였다.

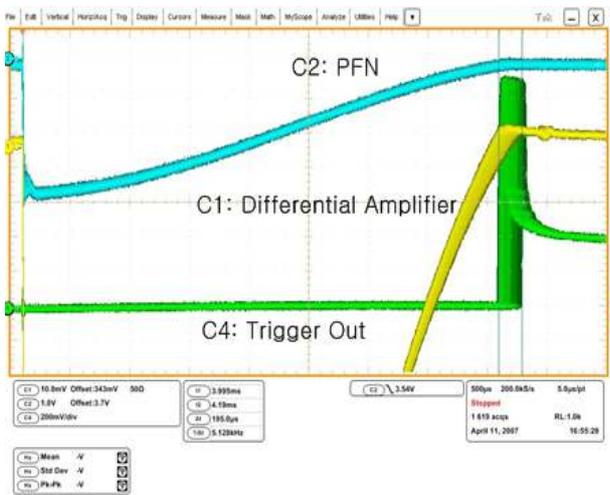


그림 5 DeQing 트리거 출력

그림 6은 35 kV에서 deQing을 하지 않은 상태에서 안정도를 differential amplifier로 약 5분간 측정하는 것으로, mean 368.6 mV, standard deviation 1.87 mV. 안정도 0.5%임을 알 수 있다. 그림 7은 35 kV에서 deQing을 한 상태에서 안정도를 differential amplifier로 약 5분간 측정하는 것으로 mean 345.2 mV, standard deviation 53.11 mV. 안정도 0.015%임을 알 수 있다.

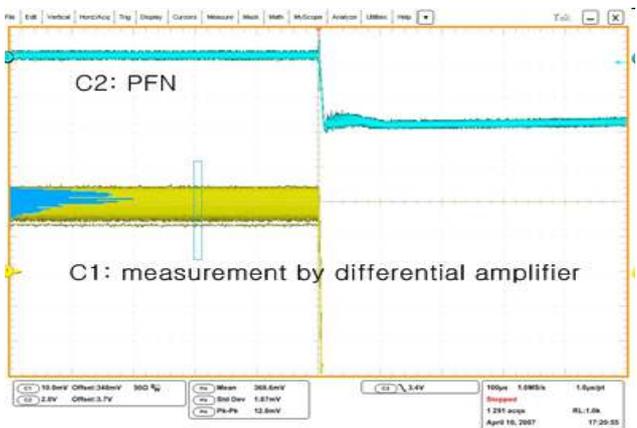


그림 6 DeQing 하지 않은 상태의 PFN 전압 파형

C1: X = 100 μ s/div, Y = 10 mV
C2: X = 100 μ s/div, Y = 2.0 V

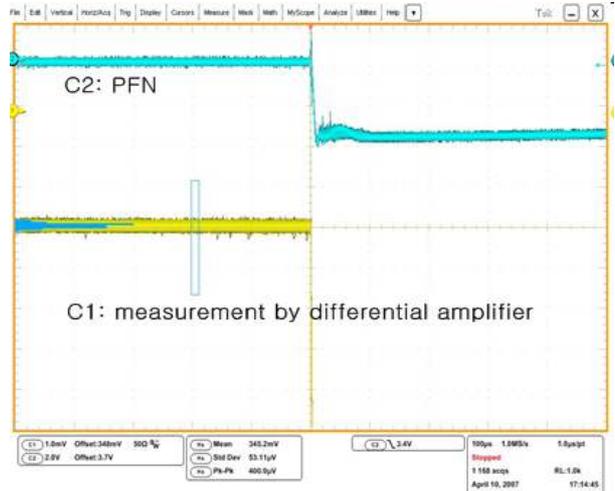


그림 7 DeQing 하지 않은 상태의 PFN 전압 파형
C1: X = 100 μ s/div, Y = 1 mV
C2: X = 100 μ s/div, Y = 2.0 V

3. 결론

제4세대 방사광가속기는 100 PPM급의 클라이스트론 펄스 전압 안정도를 요구하므로 이러한 안정도를 유지시켜 주기위한 일환으로 deQing controller를 개발하게 되었다. PFN 충전전압을 미분하여 그 출력전압인 analog 신호를 digital 신호로 변환하여 트리거 출력을 지연시키는 기능을 사용하여 deQing을 함으로서 약 150 PPM의 안정도를 얻을 수 있었다. 향후 개발된 deQing controller를 linac의 main modulator에 설치하여 field test를 실시 할 계획이다.

이 논문은 과기부의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] R. B. Neal, ed., "The Stanford Two-Mile Accelerator," W. A. Benjamin, New York, 1968.