

## 고정밀 고전압 CCPS를 이용한 200 MW 모듈레이터용 3상 480Vac 전원 분석

박성수\*, 김상희\*, 권세진\*, 이흥수\*, 강홍식\*, 고인수\*, 신현석\*\*, 김동수\*\*\*\*  
 포항공대 가속기연구소\*, 포스코ICT(주)\*\*, 다원시스(주)\*\*\*\*

### 3 Phase 480Vac Power Source Analysis of 200 MW Modulator using High Fine HV CCPS

S.S.Park\*, S.H.Kim\*, S.J.Kwon\*, H.S.Lee\*, H.S.Kang\*, I.S.Ko\*, H.S.Shin\*\*, D.S.Kim\*\*\*\*  
 POSTECH, Pohang Accelerator Laboratory\*, POSCO ICT. corp.\*\*, Dawonsys corp.\*\*\*\*

**Abstract** - 포항가속기 연구소에서 4세대 10 GeV 전자를 가속시키기 위하여 대전력 펄스 RF 51sets가 요구된다. 대전력 RF 펄스 공급원으로 200MW 펄스 모듈레이터를 사용하고 있으며 모듈레이터에 공급하는 고전압 전원을 인버터 전원공급장치를 사용한다. 인버터 전원공급장치의 입력 전원은 3상 480 Vac을 사용하고 있으며 운전시 고전압 전원공급장치에서 많은 고조파가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 고조파 성분을 측정 분석하고 고조파 성분을 저감하기 위한 대책 방안을 강구하고자 한다.

로 정류 후 고전압으로 승압하기 위하여 빠른 주파수로 변환하는 인버터를 사용하고 있으며 인버터를 사용하여 교류로 만든 후 고압으로 승압을 한 후 정류를 해서 고전압을 모듈레이터에 공급하는 방식을 사용하고 있다.

## 1. 서 론

10 GeV의 에너지를 얻기 위하여 사용하는 마이크로웨이브소스는 인버터형 고전압 전원장치를 사용한 200 MW 모듈레이터 및 80 MW 클라이스트론 51set를 사용하여 전자를 가속할 예정이다. 개별 모듈레이터는 부하로 S-band E37320 80 MW Klystron을 사용하고 있으며 출력 200 MW, 펄스폭 8us, 반복횟수 60 Hz, 평균 전력은 96kJ/sec 이며 운전조건을 만족하는 고전압을 공급하기 위하여 인버터형 고전압 전원장치 30 kJ/sec 4대로 120kJ/sec 공급하고 있다.[1],[2] 전자빔을 가속하기 위하여 요구되는 입력 전력은 4.9 MW이며 현재 가속기연구소에서 2.5 MVA 2개와 3.0 MVA 2개를 설치하여 운용할 예정이며 환전으로부터 전원공급장치까지의 입력 계통도는 154 kV/22kV, 22kV/6.6kV, 6.6kV/480V의 3단계 강압트랜스포머를 사용하여 모듈레이터용 고전압 전원장치에 3상 480 Vac를 공급한다.

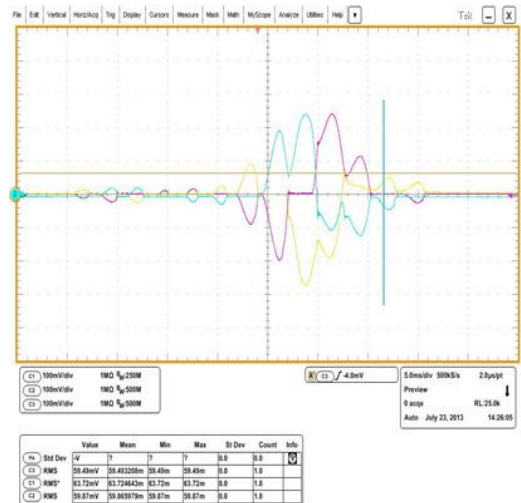
## 2.3. 고조파 측정 및 분석

200 MW 모듈레이터에 클라이스트론 부하를 설치하여 고정밀 인버터 전원장치에서 발생하는 고조파를 측정하여 분석하였다. 그림 2는 전원측에 보상회로를 사용하지 않고 120 kJ/sec 고전압 전원장치를 사용하여 고전압 40 kV 60Hz로 운전시 480Vac 입력측에서 측정된 전류 파형이다.

## 2. 본 론

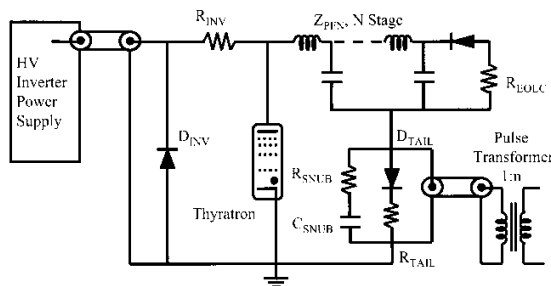
### 2.1 200 MW 펄스 모듈레이터

10 GeV 에너지를 가속하기 위한 선형가속기의 RF 전력공급 장치는 51 set의 클라이스트론-모듈레이터로 구성되어 있다. PAL-XFEL에서 요구되고 있는 에너지를 공급하기 위하여 사용하는 모듈레이터의 사양은 펄스 전압 400 kV, 펄스 전류 500 A, 펄스폭 8.0 us, 펄스 반복율은 60 Hz이다. 고전압 인버터 전원공급기는 약 120 kJ/s이며 충전시간은 약 12 ms이다. 펄스를 만들어 주는 모듈레이터는 고전압 인버터 전원공급기로부터 공급받은 에너지를 PFN 커패시터에 직접 충전시켜서 사이라트론 스위치를 통하여 부하에 에너지를 전달하는 한다.



〈그림 2〉 인버터형 고전압 전원장치 전류 파형

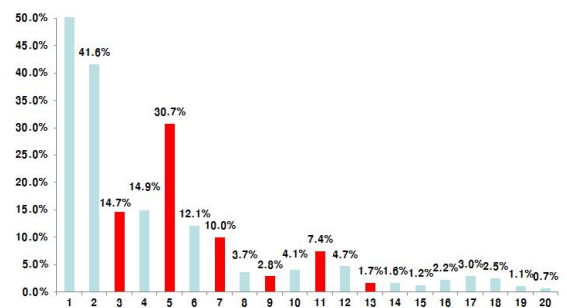
그림 3은 입력 전원측에서 측정된 고조파 전류 스펙트럼으로 우수 고조파 2차 41.6%, 4차 14.9%가 발생을 하였으며 3차, 5차의 고조파가 각각 14.7%, 30.7% 발생하였다. 측정된 각상의 파형과 고조파를 분석 결과 한주기의 16.67ms 중 13.4 ms 기간 동안에만 인버터 전원장치가 동작을 하는 특성으로 인하여 예상하지 못한 고조파가 발생한 것으로 판단하였다.



〈그림 1〉 인버터 전원공급기를 사용한 모듈레이터 회로

### 2.2. 인버터형 고정밀 고전압 전원공급장치

펄스 모듈레이터의 고전압 공급용으로 사용하는 고전압 전원 장치는 30 kJ/sec 4대, DSP 정밀 제어기 1대가 set로 구성이 된다. 인버터 전원장치의 구성도에서 3상 480Vac 입력을 받아 DC



〈그림 3〉 입력 전원측 고조파 전류 스펙트럼[%]

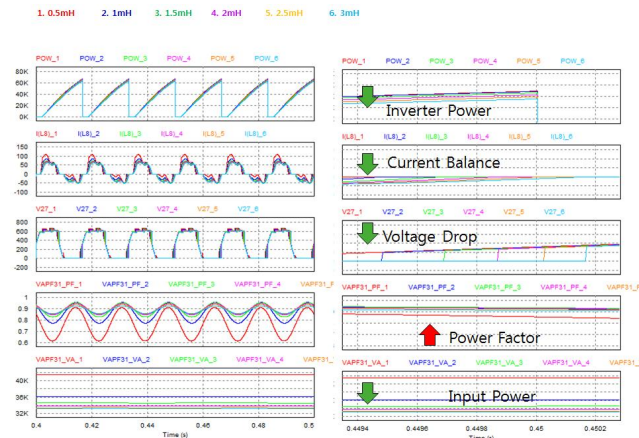
4세대에서 1차 설계한 모듈레이터용 변압기의 용량은 2.5 MVA, 3.0 MVA 각각 1개로 부하 특성을 고려한 계통을 분석한 결과 여유분이 없는 상태로서 표 1에서와 같이 변압기 보강 및 고조파 저감 그리고 기타 역할을 개선되어야 한다.

〈표 1〉 모듈레이터 기본 변압기 정격의 계통 특성 분석표

TR 정격	변압기 명	TR 1-1	TR 2-1
	1차 정격 전압 [V]	6,800	6,600
	2차 정격 전압 [V]	480	480
부하 조건 (모듈레이터 특성)	정격 용량 [kVA]	2,500	3,000
	정격 전류 [A]	3,007	3,608
	수할 [Q·tv]	22	30
	P [kW]·Max	1,524	2,078
	S [kVA]·Max	2,078	2,833
	Q [kvar]·Max	1,412	1,926
	PF [%]	73.3%	73.3%
	총 부하 전류 [A]	2,765	3,771
	Ithd [%]·Max	53.5	53.5
	허용전류 pu [%]	0.7886	0.7866
기본 조건 고조파 변수	K-factor pu	5.662	5.662
	변압기 운전 가능 전류 [A]	2,371	2,838
기본 조건 정격	변압기 여유율 [%]	-16.6%	-32.9%

2.4. 고조파 대책 시뮬레이션 및 시험

인버터 입력전원에 발생한 고조파를 저감하기 위한 방안으로 입력 전원 라인에 리액터를 추가하는 방안을 시뮬레이션을 통하여 검증 후 시험을 하였으며 그림 4와 같다. 입력측에 1mH에서 6mH까지 1mH씩 증가 시켰을 경우를 시뮬레이션을 하였으며 Power Factor 및 고조파 성분을 검사한 결과 약 1.5 mH 정도가 적당하였다. 표 2는 입력측 리액터를 1.0 mH에서 2.5 mH까지 0.5 mH씩 증가 시켰을 경우 분석한 자료이다.

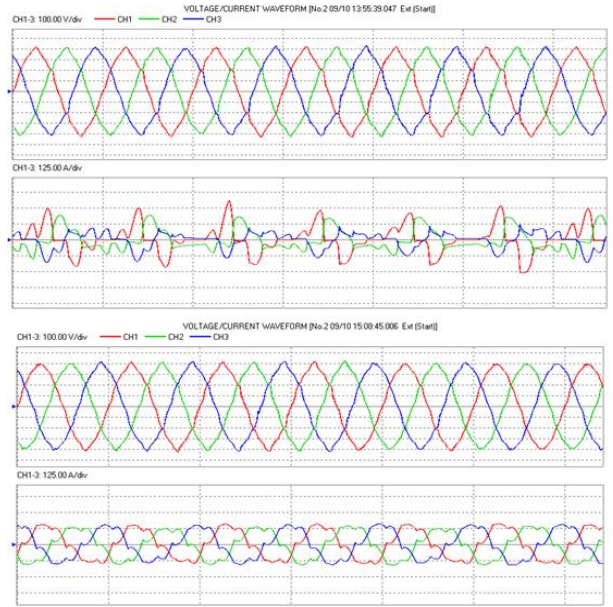


〈그림 4〉 전원측에 리액터를 추가했을 경우의 전력 분석

〈표 2〉 전원측에 리액터를 추가했을 경우의 전력 분석

	1mH	1.5mH	2mH	2.5mH
Power	67.1k	66.4k	65.6k	64.7k
입력 전류	42.4	40.6	39.9	39.5
입력 전압	428.2	424.4	420.5	416.6
Power F	0.87	0.893	0.898	0.896
THD@I	0.49	0.36	0.3	0.26

입력 전원측에 1 mH의 리액터를 추가 했을 경우 그림 5의 아래와 같이 전류 파형이 개선이 되며 고조파 외형율이 59.82 ~ 66.5%에서 17.48 ~ 18.21로 약 72% 저감되는 효과가 나타났다. 그러나 1.0mH의 인덕터는 실측 평균전류 105.3(A) 기준시 리액터 용량이 12.5 KVA이며 모듈레이터 용량 87 KVA기준으로 15% 리액터가 설치된 것으로 판단이 되며 일반적으로 비선형부하의 고조파 전류 감소를 위하여 설비용량의 3 ~ 5% 인덕터가 적용된다. 따라서 약 10%의 인덕터를 적용할 경우 약 600 uH 정도의 리액터를 사용해야하며 추가로 인버터 전원공급 장치의 DC link에 사용하는 커패시터의 용량을 2.5배 증가시켜 저감할 수 있다.



〈그림 5〉 입력 전원측에 1mH 인덕터를 추가했을 경우의 전압, 전류 파형 (윗쪽 : 인덕터 추가전, 아래쪽 : 인덕터 추가 후)

〈표 3〉 기본 변압기 정격에서 역률 개선용 SVC를 사용했을 경우의 계통 특성 분석표

역률 개선	유효전력 P [kW]	1,524	2,078
	개선 전 역률 [%]	0.733	0.733
	개선 목표 역률 [%]	0.96	0.96
	필요 보상 무효전력량 [kvar]	967.9	1,319.8
	설치 콘덴서 (SVC) 용량	1,000	1,500
	역률 개선 전 피상전력	2,078	2,833
	역률 개선 후 피상전력	1,578	2,121
역률 개선 후 고조파 변수	역률 개선 후 전류 [A]	2,253	3,043
	허용전류 pu [%]	0.8378	0.8395
	K-factor pu	4.260	4.211
역률 개선 후	변압기 운전 가능 전류 [A]	2,519	3,028
	변압기 여유율 [%]	11%	0%

표 3과 같이 역률 개선용 SVC를 각각 1 MVA, 1.5 MVA를 사용했을 경우 약 0.96까지 개선된다.

3. 결 론

포항가속기 연구소에서 4세대에서 요구하는 에너지를 제공하기 위하여 사용하는 3상 480V 입력 전원은 인버터형 고전압 전원공급장치를 사용함으로써 우수 고조파 2차 41.6%, 4차 14.9%와 3차, 5차 7차의 고조파가 각각 14.7%, 30.7%, 10.0%등 고조파 성분이 많이 함유되고 역률이 0.73정도로 나쁘다. 이러한 고조파 성분을 저감하기 위하여 입력 전원을 측정하였으며 고조파 저감용 600 uH 리액터를 입력 전원측에 추가하였으며 추가로 인버터의 DC link용 커패시터 용량을 2.5배로 키움으로 저감할 수 있었고 역률 개선용 SVC를 사용하여 0.73에서 0.96으로 역률을 높였다. 또한 모듈레이터에 공급되는 6.6 kV/480V 강압 트랜스퍼머의 용량을 4.5 MVA 에서 2배로 증가시켜 설치할 계획이다.

[참 고 문 헌]

[1] S. H. Nam, J. S. Oh, M. H. Cho, and W. Munkung, "Prototype Pulse Modulator for High Power Klystron in PLS Linac," IEEE Conf. Records of the 20th Power Modulator Symp., Myrtle Beach, SC, 1992, pp. 96-99.  
 [2] R. B. Neal, ed., The Stanford Two-Mile Accelerator, Q. A. Benjamin, New York, 1968.