

배가스 펄스코로나 처리공정 실험설비용 20 kW급 자기펄스압축형(MPC) 펄스 모듈레이터 개발

손 윤규\*, 장 성덕\*, 오 종석\*, 조 무현\*\*, 김 민호\*\*\*, 한 병욱\*\*\*

\*포항공속기연구소, \*\*포항공과대학교, \*\*\*포스콘

Development of a 20 kW pulse modulator for industrial application of pulse corona process

Y. G. Son\*, S. D. Jang\*, J. S. Oh\*, M. H. Cho\*\*, M. H. Kim\*\*\*, B. W. Han\*\*\*

\*PAL, \*\*POSTECH, \*\*\*POSCON

**Abstract** - Flue gas from fossil fuel combustion is the main source of air pollution. It is recognized that SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> (sum of NO and NO<sub>2</sub>) react with H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub> in atmosphere and convert precursors of acid rain. Streamer corona process using pulse power is one of the effective methods to remove these gases from stack. For this, pulse generator with 160 kV of output peak voltage, 0.3 μs of pulse width and 120Hz of pulse repetition rate is developed. This paper shows the pulse compression characteristics to obtain optimum parameters for basic system design.

1. 서 론

화력발전소, 시멘트 생산공정, 디젤기관 등에 주로 사용되는 화석연료가 연소될 때 연도를 통해 대기 중으로 방출되는 배기가스는 대기오염의 근원이 되고있다. 특히 연도가스에 함유되어있는 질소 산화물(NO<sub>x</sub>)과 황산화물(SO<sub>2</sub>)은 산성비와 대기오염의 주범으로 되고있다. 질소산화물과 황산화물은 대기 중의 수분과 산소 등과 결합하여 산성비를 내리게 하여 생태계를 파괴하고 건축물의 수명을 단축시키고 토양을 산성화하여 식물이 살 수 없게 하는 등의 여러 가지 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 화석연료를 연소시킬 때 생기는 질소 산화물과 황산화물을 제거하는 여러 가지 방법 중에 펄스파워를 이용한 스트리머 코로나 방전이 유효한 방법 중의 하나이다. 펄스파워를 만드는 장치에 사용되는 방전스위치는 싸이라트론, 스파크 갭을 사용하는 방법이 유용하게 사용되어 왔으나 단시간의 짧은 수명으로 인한

문제점을 극복하지 못하고 있다. 이와 같은 회로에서는 펄스압축기술에 사용되는 자기스위치를 이용하는 방법이 효과적이다.

2. 본 론

2.1 충전부

그림1은 MPC 모듈레이터 시스템의 전기회로도를 보여주고 있다. 이 시스템에서 펄스트랜스를 중심으로 충전용 캐패시터, 전원장치와 싸이라트론 스위치를 충전부라고 한다. 회로에서 직렬로 표시된 인덕터는 펄스트랜스포머의 누설인덕턴스 값을 표현한 것이다. 충전부에 설치된 캐패시터 충전을위해 10 kJ/sec의 용량을 갖는 전원장치 2대를 병렬로 사용하였다. 펄스트랜스 2차에 설치된 에너지 전달용 캐패시터의 값을 변압기 승압비로 환산하면 일차측의 에너지저장용 캐패시터와 동일한 캐패시턴스 값을 갖는다. 2차측에 캐패시터값을 일차측으로 환산하면 1차측의 캐패시터와 동일한 값을 갖는데 전원장치입장에서 보면 캐패시터는 직렬로 연결된것과 같은값으로 된다. 2차로 에너지를 전달하는 시정수는 펄스트랜스포머의 누설 인덕턴스값과 직렬로 연결된 캐패시터의 직렬회로 값으로 결정된다. 회로에서 사용된 캐패시터 충전장치의 용량은 다음과 같다.

$$P_{CU} = \frac{CV^2}{2t_f} \text{ [kJ/sec]} \tag{1}$$

전원장치의 직렬공진주파수는

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \tag{2}$$

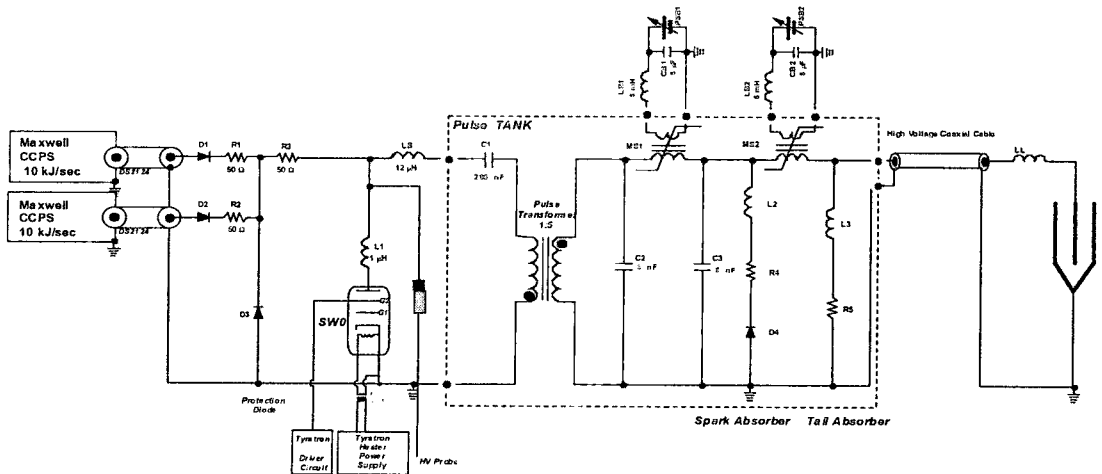


그림 1. MPC Modulator 전기회로도

평균 전력은

$$P_{AV} = \left[ \frac{1}{2} CV^2 \right] \times f_{PRF} [W] \quad (3)$$

로 된다.

C : 에너지 저장용 캐패시터 [F]

V : 캐패시터 양단 전압 [kV]

t<sub>c</sub> : 충전시간 [s]

f<sub>r</sub> : 공진주파수 [Hz]

f<sub>PRF</sub> : 운전주파수 [Hz]

캐패시터 전원장치를 사용하는 경우 부하단락이나 지락 사고로부터 전원장치를 보호할 목적으로 리버설 회로를 삽입하였다. 충전용 캐패시터와 전원장치 사이에 직렬로 연결되는 저항과 다이오드는 부하로 전달되지 못한 에너지가 전원 쪽으로 귀환하는 경우 역방향의 길을 만들어 캐패시터에 역충전되는 것을 보호하도록 하였다.

표 1. MPC 모듈레이터 설계 파라메타

Maximum output power	20 kW
Peak output voltage	100~150 kV
Peak output current	5 kA
Pulse energy	100 J
Maximum repetition rate	120 pps
Pulse width(FWHM)	500 ns
Pulse rise time	100 ns
Efficiency	~ 80 %
Maintenance interval	> 3×10 <sup>9</sup> pulse

## 2.2 자기 스위치부

자기코어의 포화특성을 이용한 인덕터는 긴 입력펄스를 짧은 펄스로 압축시킬 수 있다. 자기코어의 포화가 일어나기 전에는 자성재료의 높은 투자율로 인하여 인덕턴스가 매우 크기 때문에 개방회로처럼 동작하며 자기코어가 포화되면서 투자율이 급격히 작아져서 인덕턴스가 줄어들어 마치 스위칭이 된 것과 같이 빠르게 다음단의 콘덴서에 에너지를 전달하게 된다. 이러한 용도로 설계된 인덕터를 자기스위치라 부르며 가스나 액체형스위치에서와 같은 방전원리를 이용하지 않기 때문에 스위치의 소호를 위한 이온의 재결합 시간이 필요하지 않아 대출력인면서 높은 동작 주파수의 시스템에 유용하게 쓰일 수 있다. 각각의 자기 스위치를 출력단으로 가면서 포화인덕턴스가 점차로 줄어들게 배치하면 자기 스위치를 거치면서 공진 충전시간이 점차로 줄어들게되어 부하단에서 짧은 폭의 대 출력의 펄스를 얻을 수 있다. 그림 1에서 MS1, MS2는 펄스를 압축시키는 2단 스위치이다. 첫 번째 자기스위치 MS1이 포화되어 ON되면 싸이리드론을 통해 C<sub>1</sub>에서 C<sub>2</sub>로 에너지를 전송한 시간보다 빠르게 C<sub>2</sub>에서 C<sub>3</sub>로 에너지를 전송한다. 충전부의 C를 통해 공급되는 긴 펄스의 에너지를 자기스위치의 스위칭에 의해 짧은 펄스에너지를 다음 단으로 전송하며 이러한 작용은 부하단까지 연속적으로 된다. 자기 스위치는 코어 투자율의 포화를 이용한 것으로 캐패시터와 인덕턴스 값을 조합하여 인덕터와 캐패시터의 시정수를 조정하여 펄스를 압축하여 부하로 전달하는 것이다. 자기스위치의 설계파라메타는 2 단 모두 단면적이 71.12 cm<sup>2</sup> 평균자로는 72.26 cm이며, 각 단 코어의 권수는 22 회, 6회이다. 여기서 사용한 코어의 최대포화 자속밀도는 1.8 T이다.[1][2]

부하단에서 필요한 전압과 전류 파형에 대한 요구조건, 즉 부하저항 R, 침두전압 V, 침두전류 I, 펄스 폭 L<sub>n</sub>, 동작주파수 f가 정해지고 입력단의 스위치가 켜지면서 LC 공진충전 하는데 걸리는 에너지의 전달시간 T<sub>0</sub>를 결

정하면 다음과 같은 수식을 이용하여 코어의 부피를 최소화하는 조건으로 각 단의 자기 스위치 설계 변수를 도출할 수 있다.

$$G = \frac{T_0}{T_n} = \sqrt{\frac{L_0}{L_n}} \quad (4)$$

$$n = n_{opt} = 2 \ln G \quad (5)$$

$$g_k = constant = G^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$Core Volume = n G^{\frac{2}{n}} Q \quad (7)$$

$$Q = \frac{\pi^2 \mu_{sat} E_{pulse}}{4 (\Delta B)^2 p^2} \quad (8)$$

$$E_{pulse} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (9)$$

식 4는 시스템 이득 G는 자기 스위치 시스템의 전체 압축비로 초기 공진 충전시간 T<sub>0</sub>과 부하에 에너지를 전달하는 시간 T<sub>n</sub>의 비가 된다. L<sub>0</sub>는 입력 단의 초기 공진 충전용 인덕턴스이고 L<sub>n</sub>은 부하 단에 위치한 자기 스위치의 포화 인덕턴스이다. 식 5는 자기 스위치의 총 단계(stage) 수 n 은 주어진 시스템 이득 G에 대해 자기 코어의 부피를 최소화하는 n<sub>opt</sub> 으로 주어진다. 식 6의 g<sub>k</sub>는 각각의 자기 스위치 회로의 이득으로 자기 코어의 부피를 최소화하는 최적의 조건에 의하면 모두 같게 된다. 시스템에 필요한 자기 코어의 총 부피는 식 7과 같고 Q는 식 8에서 주어진다. μ<sub>sat</sub>는 자기 스위치의 포화투자율이고 E<sub>pulse</sub>는 콘덴서 C에 저장된 펄스 에너지로 식 9와 같으며 ΔB는 자기코어의 자속 변화량, p는 자기코어의 적층 밀도계수(packaging factor)이다.[3][4]

다단의 자기 스위치 설계는 다음과 같은 단계로 진행된 다.

- 1단계 : 자기스위치의 단수 n, 각 단 자기 스위치의 g<sub>k</sub>, T<sub>k</sub>, L<sub>k</sub>결정
- 2단계 : 각 단 자기 스위치의 코어 수 M, 권선수 N결정
- 3단계 : 각 단 자기 스위치의 구조와 권선방법 결정

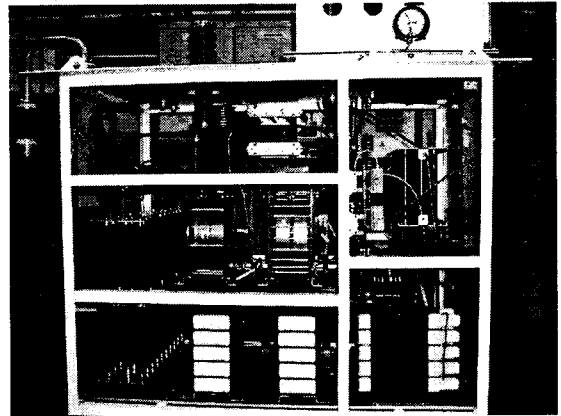


그림 2. 제작된 MPC 모듈레이터 고전압 탱크부

## 2.3 시뮬레이션

20 kW 펄스 모듈레이터 회로의 내부회로를 등가회로로 나타낸 것이다. 회로에서 자기 스위치는 포화 되기 전의 인덕턴스를 표시하고 포화된 이후의 인덕턴스는 스위치와 인덕터 다이오드를 직렬로 하여 표현하였다. 스위치는 회로의 공진충전 시간을 계산하여 타임 스위치로 그 지령을 주고 초기에는 인덕턴스가 큰 값으로 회로가 개방된 것처럼 동작하고 공진 충전시간이 경과한 후 스

위치가 동작하여 빠르게 다음 단으로 에너지가 전달되도록 하였다. 회로 전산모사에서 초기 조건은 C1에 충전하여 놓고 X2 스위치를 닫아 한 주기 동안의 펄스 압축에 대한 각 단의 전압을 그림 4에 보여주고 있다. 충전 전류와 압축펄스전류와 부하에 전달되는 전류파형이다.

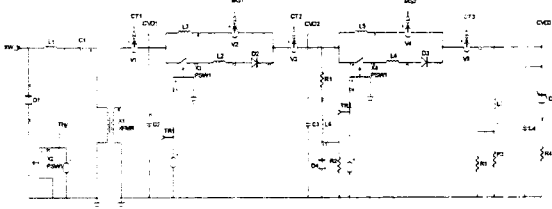


그림 3. MPC 시뮬레이션 등가회로도

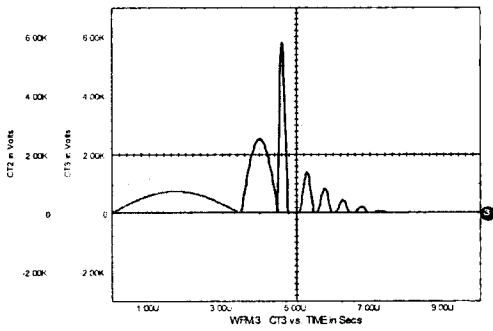


그림 4. 펄스압축시스템의 전산모사 전류파형

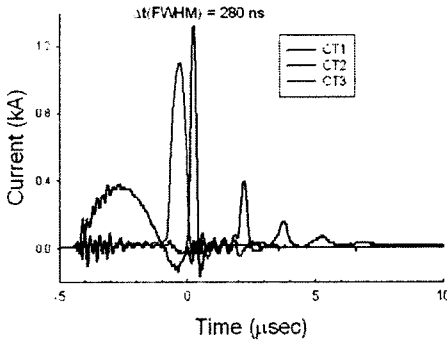


그림 5. 100 kV 출력전압 인가시의 전류파형

## 2.4 출력특성

자기 펄스 압축 시스템에서 각 단의 피크전압은 단 수가 증가함에 따라 감소한다. 이것은 포화인덕턴스의 권선저항과 캐패시터의 등가 직렬 저항의 기생효과와 부하 전류의 증가에 따른 현상이다. 그림 5는 100 kV 출력전압 조건에서 충전으로부터 펄스가 압축되는 것을 보여주고 있다.

NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>를 연도에서 제거하기 위한 고전압 자기 펄스 압축시스템의 기본구성은 2차축에서 160 kV의 펄스 전압을 공급하는 펄스변압기가 포함된 충전부 그리고 2단 스위치로 구성된다.

충전부는 스위칭디바이스와 직렬공진형 캐패시터와 직렬공진 인덕터로 구성되어 있으며 100 nF 직렬공진캐패시

터와 12 μH의 직렬 공진인덕터에 의해서 공진펄스폭은 3.5 μs 반복주파수 120 Hz의 정현파 전류를 자기스위치에 공급한다. 펄스의 특성은 반응기 내부로 유입되는 민지의 온도와 풍량 속도에 따라 달라진다. 반응기의 임피던스는 전기적인 회로로 해석할 수 있는데 캐패시터에 해당된다. 에너지를 저장하는 역할을 하면서 반응기내부에서 이온화 된 상태에서 전류가 흐르는 플라즈마 상태가 된다. 이때 방출전류가 흐르게 되고 반응이 일어난다. 부하로 전달되지 못한 에너지 일부는 전원쪽으로 되돌아오게 된다. 역으로 되돌아 온 에너지는 강제적으로 방전시켜 에너지의 레벨을 낮추어 주어야 다음 펄스가 올때 영향을 주지 않게 된다.

되돌아오는 에너지를 방전시킬 목적으로 부하와 병렬로 저항과 인덕터, 다이오드를 직렬로 연결하여 방향성이 있게 하고 정방향의 에너지에 대해서는 동작하지 말고 역으로 되었을 때 강제적으로 에너지를 소비하도록 되어있다. 또한 부하에서 단락사고가 발생시에 고주파의 써지가 전원장치로 되돌아오는 것을 방지하기위한 아크 보호회로도 함께 사용하고 있다. 제작된 회로는 설계전압까지 운전을 하였다. 일부하 실험시에도 만족할 만한 결과를 얻었다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 Pspice에 의한 시뮬레이션을 통해 비선형특성을 갖는 포화인덕터를 연도가스의 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>를 제거하기 위한 자기 펄스압축시스템의 기본적인 설계를 효율적으로 할 수 있었으며, 실제 회로를 제작할 때 반영하였다. 부하매칭을 위한 테일저항의 설계와 손실계산의 검증을 통하여 회로의 변수를 확인하였다.

## [참고 문헌]

- [1] Godfrey T. Coate, Laurence R. Swain, JR. *High Power Semiconductor Magnetic Pulse Generators*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1966
- [2] J.S.Oh, S.S.Park, S.D.Jang, M.H.Cho, I.S.Ko, and W.Namkunj, "Prototype 2 stage magnetic pulse compression modulator for pulse power application," Conf. Rec. 1996 22nd int'l power modulator Symposium, Boca Raton, Florida, June, pp.186-189, 1996.
- [3] 손윤규, 오종석 외10명. *Pulse modulator development for plasma DeNO<sub>x</sub>/DeSO<sub>x</sub> system*, KIMM 과제보고서, 1996
- [4] 손윤규, 오종석 외 5명. *Development of high power pulse generator for the treatment of sinter plant flue gas*. RIST 과제보고서, 1999