한국군사과학기술학회지 제16권 제5호, pp. 703～711, 2013년 10월

학술논문 에너지 부문

유도전압합성기를 이용한 고전압 펄스발생기 설계

Induction Voltage Adder for High Power Pulse Generator

양 종 원* Jong-Won Yang
신 진 우* Jin-Woo Shin
류 한 용* Han-Young Ryu
허 훈** Hoon Heo
이 우 상* Woo-Sang Lee
김 창 구* Chang-Gu Kim
남 상 훈** Sang Hoon Nam
소 준 호* Joon-Ho So

ABSTRACT

In this paper, we have proposed high power generator with Induction Voltage Adder of three cells. IVA which has n cells can generate n-th times high power pulse, is a more stable system than Marx generator in the view of breakdown. We applied amorphous metal magnetic cores as an energy storing material for IVA rather than ferrite cores because of their higher magnetic flux swing to make it more compact system and the loss of it was also considered in the design. For driving the IVA, we design Blumlein pulse generators which are filled with pure water for high dielectric constant and high breakdown field strength, and triggered by single Marx generator. We have presented the PSPICE simulation and its test result.

Keywords : Induction Voltage Adder(유도전압합성기), High Power Pulse Generator(고출력 펄스발생기), Marx Generator (막스 펄스발생기), Blumlein PFL(블룸라인 펄스형성기)

1. 서 론

일반적으로 수십～수백 kV급 이상의 고출력의 펄스 전원을 발생시키는 방식은 다단의 축전기와 고전압 스위치로 구성된 막스(Marx)방식, 펄스 변압기(Transformer)를 이용한 변압기방식과 마그네틱 코아를 이용한 유도전압합성기(IVA : Induction Voltage Adder)로 구분된다. 막스형태는 축전기, 저항과 고출력스위치의 조합으로 하나의 단을 구성하여 n 개로 중첩할 경우 입력된 펄스 전압의 n 배 크기의 출력 전압을 생성시킬 수 있는 방법이지만, 고출력 스위치에 의한 절연파괴 현상 및 축전기에 의한 기생용량 성분으로 인해 펄스 평탄도(Flat Top)가 높은 안정적인 펄스 형상을 얻기 힘든 단점이 있다. 변압기 방식은 펄스변압기를 이용하여 코일에 감긴 횟수에 비례하여 1 : n의 비율일 경우 입력 전압의 n배의 출력을 발생시키는 방법으로써 펄스변압기의 특성에 의존되며 인덕턴스 성분이 증가하여 상승시간이 길어지는 한계로 인해 저주파 또는 긴펄스에 사용되지만, 고주파 또는 짧은

† 2013년 5월 2일 접수～2013년 8월 16일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
** 포항가속기연구소(Pohang Accelerator Laboratory)
책임저자 : 양종원(alfred@add.re.kr)

펄스에는 사용하기 어려운 단점이 있다. 이에 반해서 유도전압합성기방식은 비교적 낮은 전압의 전원장치를 사용하여 고전압으로 승압하는 방식으로써 n 개의 펄스발생기에서 공급된 개별 고전압의 펄스를 직렬 연결된 n 개의 단위 셀로 구성된 유도전압 합성기에 의해 합성되어 n 배의 고전압 펄스를 형성하는 장치이다. 낮은 전압에서 펄스의 생산 및 가공이 이루어지므로 절연파괴 등의 기술적 위험도 측면에서 상대적으로 유리하며 전압의 승압은 유도전압합성기의 개수를 늘려감에 따라 구현할 수 있는 장점이 있으나, 상대적으로 장치가 복잡해지는 특징을 가진다.

2. 고전압 펄스발생기 설계

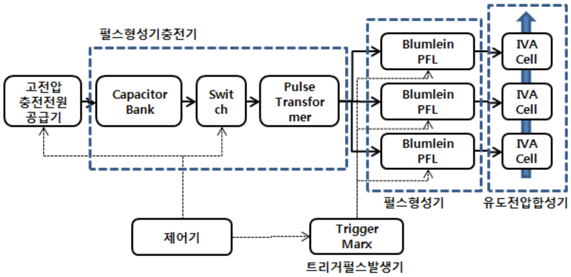

Fig. 1. Block diagram of IVA Pulse Generator

고전압 펄스발생기는 Fig. 1과 같이 1차전원을 이용하여 반복 가능한 고전압, 고출력의 펄스전원을 생성하는 장치이다. 이를 위하여 유도전압합성기, 펄스형성기, 펄스형성기충전기, 고전압충전전원공급기, 트리거펄스발생기, 제어기 등으로 구성하여 설계하였다. 즉, 목표 사양을 만족할 수 있는 고전압펄스발생기로써 유도전압합성기 방식으로 설계하고 이 유도전압합성기에 펄스를 공급하는 펄스형성기를 설계하였다. 유도전압합성기 방식(IVA)은 여러 개의 낮은 펄스전원을 이용하여 높은 전압으로 승압하는 장치로써 일종의 펄스변압기로 이해될 수 있다. 펄스형성기는 펄스폭을 고려하여 Blumlein PFL로 설계하였으며 장치의 요구조건에 따라 장치의 길이 혹은 크기, 출력 파형의 펄스 상승시간과 펄스폭을 고려하여 설계하였다. 고전압충전전원공급기는 고전압 펄스발생기의 작동에 사용되는 수십 kV급의 고전압을 공급하는 장치로써 상용 전력을 사용하여 펄스형성기충전기의 1차 측의 고전압 축전기를 수십 kV로 주어진 시간 안에 충전을 완료할 수 있도록 설계한다. 또한, 트리거펄스발생기는 펄스형성기의 작동에 사용되는 고전압스위치를 기동시키는 역할을 수행하며, 제어기는 시스템의 운전 상태를 감시 또는 모니터링하며, 인터락, 운전제어 등을 수행하는 기능을 가진다. 그 외에 시험지원장비로는 장치의 작동에 및 운용 환경을 제공하기위하여 초수순공급기, 기체 공급기, 절연유 공급기, 진공장치 및 고정지그, 오일 탱크 등으로 구성하였으며 최종출력은 전압, 전류 센서에 의하여 검출되어 계측기에 의하여 계측되어진다.

가. 유도전압합성기 설계

유도전압합성기는 n 개의 셀(또는 단)로 구성되며 각각의 셀은 독립된 전압인가 장치에 의하여 구동된다. 즉, 각각의 셀에 1 V 만큼의 전압을 인가하면, 중심의 inner stalk의 끝단에는 이상적으로 n V의 전압이 출력된다.

3단으로 구성된 유도전압합성기의 구조는 Fig. 2와 같이 단일 셀은 여러 개의 토로이달 마그네틱 코아와 중심의 원통형 stalk, 절연체로 구성되며 마그네틱 코아는 금속 실린더에 의하여 1 턴 코일 구조를 형성하고 이 코일의 끝은 외부의 펄스 입력 케이블과 연결되어 펄스 전력이 셀에 공급된다.

Fig. 2. 3D drawing of 3 stages IVA

유도전압합성기는 다수의 구동전원을 동시에 인가하여야만 최적의 성능을 얻을 수 있으므로 개별 셀의 출력전원 간의 지터(Jitter)를 최소화 하여야 한다. 구동전원의 지터발생의 요인은 스위치의 지터 문제이므로 구동전원의 스위치 지터를 최소화 할 수 있는 방

법을 선택하여야 한다. 개별 구동전원장치의 지터가 σ인 경우에 n 개의 구동전원장치에서 예상되는 지터는 통계적으로 다음 식 (1)과 같다.

$$\sigma_T = \sqrt{n}\sigma \tag{1}$$

따라서 개별 구동전원장치의 수를 최소화 하면 유도전압합성기 방식의 전원장치의 지터 위험을 최소화 할 수 있다. 유도전압 합성기의 부하 임피던스를 67 Ω으로 가정할 경우에 유도전압합성기의 손실을 무시할 수 있는 경우에 구동 펄스전원의 임피던스를 고려하면 최대 5 단의 유도전압합성기 설계가 가능하다. 유도전압합성기 방식이 최대 장점인 낮은 구동전원의 사용 목적을 고려하여 볼 때 2 단 이상의 유도전압합성기 방식이 타당하므로, 유도전압합성기의 내부 손실을 고려할 경우에 본 연구의 경우에는 3 단의 유도전압합성기 방식을 적용하였다.

나. 마그네틱 코아 설계

마그네틱 코아로 사용되는 대표적인 물질은 규소박판 계열, 비정질 금속 계열, Nanocrystalline 계열, Ferrite 계열 등이 있다. 본 논문에 적용할 마그네틱 코아의 선정은 전기적 성능과 함께 수급 가능성도 고려하여야 한다. 특히 전기적 성능을 결정하는 요인으로 코아의 자기 용량 특성, 코아의 손실 특성이 중요한 요소이다. 마그네틱 코아의 자기 용량 특성은 마그네틱 코아로 제작된 셀에 인가되는 전기적 에너지에 관련되며 최종 전압을 얻기 위하여 한 개의 셀에 각각 인가되는 전압은 최소한 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$V_{cell} \geq \frac{V_{IVA}}{n} \tag{2}$$

여기서 V_{cell}은 단위 셀에 인가되는 전압이고, V_{IVA}은 IVA에 출력하고자 하는 전압이며, n은 IVA 셀의 개수이다. 반치전폭(FWHM : Full Width at Half Maximum)기준 펄스폭이 τ인 경우에 셀 내부의 마그네틱 코아에 유도되는 마그네틱 플럭스는 식 (3)과 같다.

$$\oint_{Ac} B \cdot dA = \int_0^{\tau} V(t)dt \tag{3}$$

마그네틱 코아의 구조는 Fig. 3과 같이 토로이달 형태를 가지므로 마그네틱 코아의 단면적 A_c를 관통하는 마그네틱 플럭스는 $B \cdot A_c$이므로 식 (3)은 다음 식 (4)와 같이 간단히 정리된다.

$$V_{cell} \times \tau = B \cdot A_c \tag{4}$$

즉, 동일한 펄스폭 조건에서 높은 전압의 펄스를 구동할 수 있는 마그네틱 코아로 사용할 수 있으려면 마그네틱 코아에 인가할 수 있는 자기장 세기 한도인 포화자속밀도 B_s가 큰 물질을 사용하던가, 혹은 단면적이 큰 마그네틱 코아를 사용하여야 한다. 또한, 마그네틱 코아는 물질의 특성에 따라 히스테리시스(Hysteresis) 손실과 와전류(Eddy Current)손실이 발생하게 되는데 펄스폭이 작을수록 코아의 손실은 크게 증가하는 특성을 보이므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

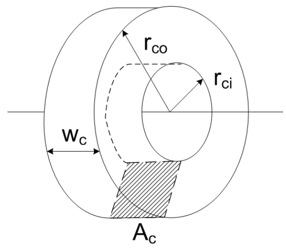

Fig. 3. Toroidal Magnetic Core

본 연구에서의 마그네틱 코아는 Fe based amorphous metal인 Metglas사의 2605 시리즈 중 2605SA1을 사용하였는데 이는 Ferrite 혹은 Nano-crystalline에 비하여 비교적 크지만 수급이 용이하고 고온에서 토로이달 자기코아의 원주방향으로 자장을 인가하면 포화자속밀도(Bs)와 잔류자속밀도(Br)의 비로 정의되는 각형비(High Squareness, Br/Bs) 또는 BS직각도(Squareness Ratio)가 높은 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 와전류손실에 의한 전력손실과 고전압에 의한 절연파괴를 방지하기 위하여 코아 중간에 절연필름(Kapton)을 삽입하여 적층구조(Laminate)를 형성한 후 권선된 리본은 어닐링(Annealing)이라는 열처리를 하였다. 이러한 절연필름 삽입방법은 절연물 코팅 방법에 비하여 점적율이 낮기 때문에 장치의 크기가 증가하는 단점이 있으나, 고전압에 의한 절연율이 높으며 제작 방법이 간단한 장점이 있다.

본 설계에서는 코아손실과 펄스폭 등을 고려하여 플럭스 스윙을 식 (5)와 같이 설정하였으며 설계된 단일 코아의 크기 및 무게는 Table 1과 같다.

$$\Delta B \doteq 1T \tag{5}$$

Table 1. Parameters of Magnetic Core Unit

변수	Unit	값
Unit Core Width	m	2.50E-02
Number of cores per cell		10
Unit Core Ri(inner radius)	m	1.79E-01
Unit Delta R(Ro-Ri)	m	9.60E-02
Unit Core Ro(outer radius)	m	2.75E-01
Core Weight	kg	1.45E+02

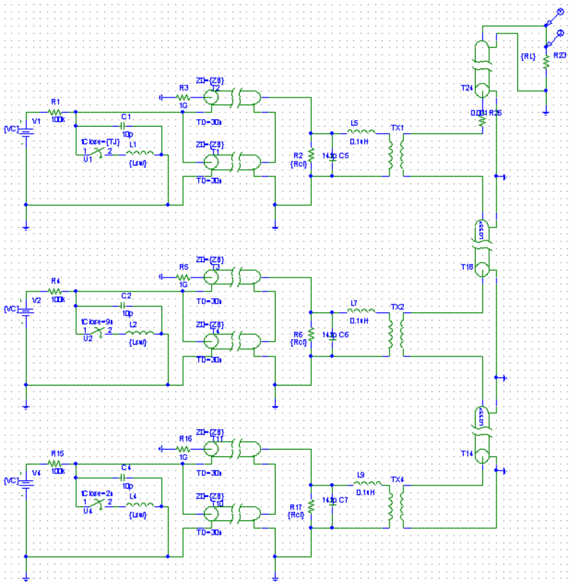

Fig. 4. PSPICE Model of 3 stage IVA

Fig. 4는 3 단으로 구성된 유도전압합성기의 PSPICE 모형으로 펄스형성기에 의하여 충전되는 유도전압합성기를 변압기 모형으로 계산하였다. 단위 유도전압합성 셀을 구동하는 펄스전원은 특성 임피던스가 13 Ω인 TML(Transmission Line)과 스위치 모형으로 구성하였는데 스위치의 인덕턴스는 60 nH로, 스파크 갭 스위치의 전극 사이의 축전용량은 1 pF으로, 마그네틱 코아의 투자율 상수는 100로 가정하였다. Fig. 5은 코아 손실이 46 Ω과 25 Ω으로 가정할 경우에 펄스형성기의 충전 전압이 210 kV에 대한 출력 전압파형이다. 출력 파형은 약 22 ns의 상승시간, 전압 변동율 10 % 펄스폭은 약 23 ns이며 3 단 연결에 의한 입력전압 대비 약 3 배의 전압이 합성 출력되는 것을 확인하였다.

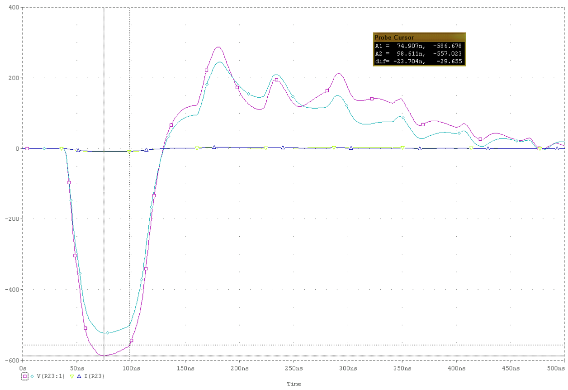

Fig. 5. Simulation Result of 3 stage IVA

다. 펄스형성기 설계

높은 구동 전압과 빠른 상승시간, 수십 ns의 펄스폭을 갖는 구형펄스를 얻기 위해서는 펄스형성기가 필요하다. 즉, 펄스형성기는 구형파의 고전압의 펄스를 발생시키는 장치로써 PFL(Pulse Forming Line)방식과 PFN(Pulse Forming Network)방식을 고려할 수 있다. PFL 방식의 펄스형성기는 전송선로를 사용하여 펄스를 생성하는 방법이고 PFN은 전송선로 대신해서 축전기와 인덕터를 직・병렬로 교차 배치하여 전송선로와 같은 효과를 얻어서 펄스를 생산하는 방법이다. PFN 방식은 다수의 인덕터와 축전기를 사용하므로 짧은 펄스에는 적용이 어렵고 비교적 긴 펄스폭의 펄스를 생산할 때 이용되므로 본 연구에서는 100 ns 이하의 짧은 펄스에 대해서는 일반적으로 적용하는 PFL 방식을 사용하였으며, 특히, 임피던스 매칭 시에 충전 전압 조건이 완화되는 Blumlein PFL을 적용하였다.

PFL의 펄스폭과 임피던스는 기하학적 형태에 따라서 결정되는데, 일반적인 고전압 장치의 경우에 실린더 구조를 이용하며 이때, PFL의 임피던스는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{PFL} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \tag{6}$$

$$Z_{BPFL} \approx 2Z_{PFL} \tag{7}$$

이때, r_i와 r_o는 동축전선의 내경과 외경이며, ϵ_r는

동축전선 내부의 유전상수이다. 위의 식을 고려하면 낮은 임피던스를 얻기 위해서는 높은 유전상수를 가지는 유전체를 사용하여야 하는데 초순수는 유전상수가 81로 높고 고순도일 경우에 높은 비저항을 가지고 있어서 고전압 Blumlein에 널리 사용된다. 따라서 본 논문에서는 펄스 상승시간과 Blumlein PFL의 내부 절연 성능 등을 고려할 때 최적의 Blumlein 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{BL} = 2\frac{60}{\sqrt{81}} ln(e) \approx 13.4 \;\; \Omega \tag{8}$$

또한, PFL의 길이를 l_{BLPFL}이라 할 경우에 반치전폭 기준의 펄스폭 τ_{FWHM}은 다음과 같이 결정된다.

$$\tau_{FWHM} = 2\frac{l_{BLPFL}}{v_p} \tag{9}$$

여기서 v_p는 위상속도로서 PFL 내의 유전체의 유전율이 ϵ이고, 투자율이 μ일 때 다음과 같다.

$$v_p = \frac{l_{BLPFL}}{\sqrt{\epsilon\mu}} \tag{10}$$

따라서 원하는 펄스폭 τ_{FWHM}의 펄스를 생성하는 Blumlein PFL의 길이는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$l_{BLPFL} = \frac{\tau_{FWHM}}{2}\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{11}$$

즉, Blumlein PFL의 펄스폭은 PFL의 길이와 유전체의 유전상수에 의존한다. 따라서 원하는 펄스폭 내에서 장치의 길이를 최소화할 경우에는 유전상수가 큰 물질을 사용하여야 하며, 원하는 펄스폭이 클수록 장치의 크기 또한 증가하므로 시스템 특성에 맞도록 설계하여야 한다. 본 논문에서는 유전물질로 초순수를 사용하였으며 펄스폭이 60 ns인 경우에 Blumlein PFL의 길이는 1 m로 설계하였으며 그 구성은 Fig. 6과 같다.

Fig. 7은 Blumlein PFL의 PSPICE 모델이다. 이중 동축전선 구조의 Blumlein은 각각 전기적 길이가 $\tau/2$인 동축전선 2 개로 모델링하였다. Blumlein의 내외각의 동축 구조에 의하여 구성되는 특성임피던스는 TML의 임피던스와 같다. 스위치는 중간 실린더와 외각 실린더 사이에서 작동된다. 스파크 갭 스위치의 인덕턴스는 20 nH로 가정하였다.

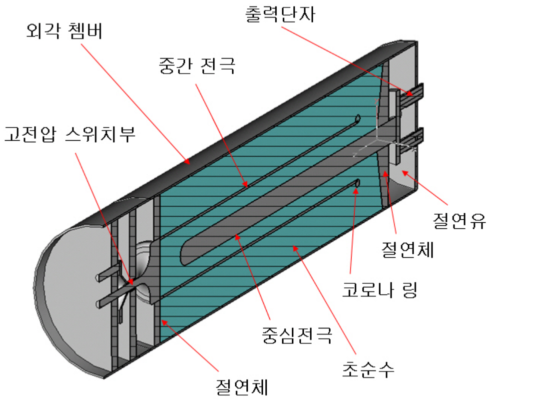

Fig. 6. Schematic Diagram of Blumlein PFL

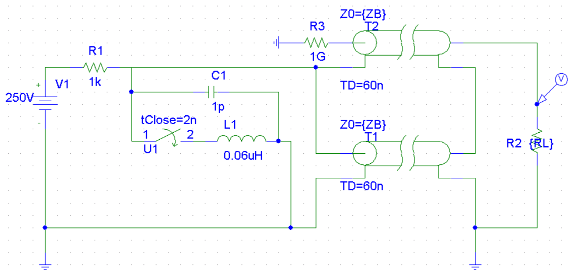

Fig. 7. PSPICE model of Blumlein PFL

부하의 임피던스가 Blumlein의 임피던스와 일치할 경우의 출력 파형은 Fig. 8과 같이 입력 전압이 250 V일 때 약 246 V의 전압이 부하에 발생되며 펄스 상승시간은 20 ns이다.

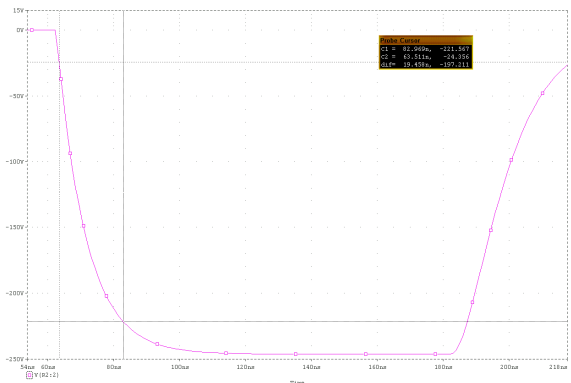
Fig. 8. Simulation Result of Blumlein PFL

라. 펄스형성기충전기 설계

펄스형성기는 펄스형성기의 고전압 스위치가 작동되기 전까지는 고전압 축전기로 동작하는데, 펄스형성기를 고전압으로 충전하는 펄스형성기충전기로는 고반복 운전에 유리한 변압기 충전방식을 적용하였다. 즉, 축전기 충전전원장치를 사용하여 충전된 1차 축전기의 전압이 고출력스위치 등에 의하여 방전되면 고전압 펄스변압기에 의하여 2차 축전기가 고전압으로 충전되는 방식이다. C_1과 C_2를 각각 1차 충전용 축전기와 2차 충전용량이라고 할 경우, Blumlein PFL 펄스형성기의 축전용량 C_2는 다음과 같이 계산된다.

$$C_2 = n_B\tau / Z_{BPFL} \tag{12}$$

여기서, n_B는 Blumlein PFL의 개수이고, τ는 펄스폭이며, Z_{BPFL}는 단일 Blumlein PFL의 임피던스이다.

변압기의 승압 비율(Turn Ratio)은 2차 충전 전압과 1차 충전 전압을 고려하여 선택되는데, 스위치의 동작전압을 고려할 때 1차 축전기의 충전 전압은 30 kV 전후가 타당하므로 펄스형성기의 동작전압을 고려할 때 펄스 충전변압기의 승압율은 8로 하였으며 세부내용은 Table 2와 같다. 또한 1차측의 고출력스위치로는 싸이라트론(Thyratron) 스위치를 선택하였는데 이는 고반복이 가능하며 매우 안정적으로 스위치 작동이 가능하며 고출력 스위칭이 가능하다.

Table 2. Parameters of Charging Unit

항목	단위	값
변압기 2차 전압 Vsec	kV	240
변압기 1차 전압 V_pri	kV	30
변압기 1차 최대 전압	kV	35
최소 승압비		8
변압기 권선비		8
2차 축전기 용량	nF	27
1차 축전기 용량 @ 공진	nF	1722
1차 축전기 용량 @ 설계	nF	2.4E+03
Blumlein 충전	s	5.6E-06

Fig. 9는 펄스형성기충전기의 구성도이다. 1차측 축전기(C_1)에 고출력 스위치인 싸이라트론 스위치가 연결된다. 싸이라트론 스위치의 작동을 위하여 Cathode Heater 전원공급기와 Reservoir Heater 전원공급기가 부착되며, 싸이라트론 스위치의 trigger가 thyratron grid 전극에 연결된다. 1차측 축전기는 고전압충전전원장치에 의하여 DC로 충전되며 변압기 1차 권선과 연결된다. 이때, 변압기의 1차측은 변압기 코아의 Reset을 위한 인덕터와 Core Reset 전원공급기가 연결되며 2차측은 펄스형성기의 충전 단자와 연결된다.

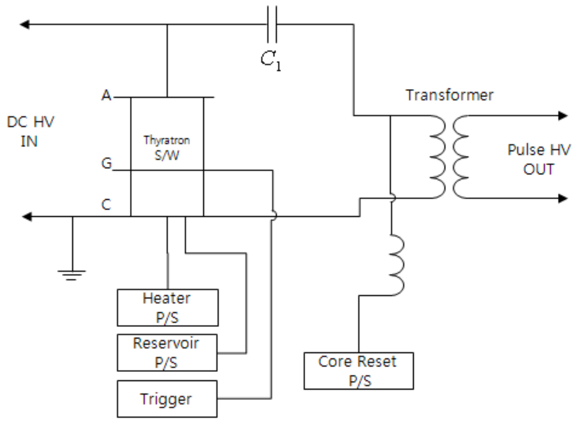

Fig. 9. Charging Circuit Diagram for Blumlein PFL

마. 고전압 충전전원공급기 설계

고전압 충전전원공급기는 고전압 펄스발생기의 작동에 필요한 수십 kV급의 고전압을 공급하는 장치이다. 즉, 상용 전력을 사용하여 고전압펄스발생기의 펄스형성기 충전기의 1차측 고전압 축전기에 수십 kV로 주어진 시간 안에 충전을 완료할 수 있도록 설계되어야 하며 안정적 운용을 위한 전원분배기, 고전압 충전전원공급기 보호회로 등이 필요하다. 일반적으로 축전기의 충방전 사이클은 Fig. 10과 같은데 이때, t_c는 고전압 충전전원공급기가 목표 충전전압까지 축전기를 충전하는데 까지 걸리는 시간이며 t_d는 dwell time으로 스위치가 작동되어 축전기에 충전된 전압이 방전될 때까지의 시간에 해당되는데 스위치에 의한 방전시간은 충전 시간 혹은 dwell time에 비하여 매우 짧을 경우에 무시할 수 있다. t_D는 다음 충전 시작 전까지 축전기충전전원장치의 대기 혹은 작동 금지 시간이다. 따라서 펄스 충방전 반복율 혹은 펄스 반복 주기는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$T = t_c + t_d + t_D \tag{13}$$

본 연구에서는 t_D와 t_d의 시간을 고려하여 t_c를 다음과 같이 설정하여 설계하였다.

$$t_c \doteq 80 \quad [ms] \tag{14}$$

즉, t_c 이후에 $t_d + t_D$ 시간 내에 고출력 스위치가 작동되어 축전기의 방전이 완료된다. 고전압충전전원기의 주요 설계변수는 Table 3과 같다.

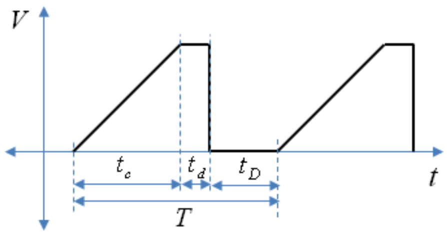

Fig. 10. Time Sequence of CCPS

Table 3. Parameters of Charging Power Supply

설계 변수	단위	값
T	s	0.1
Tc	s	0.08
Td + TD	s	0.02
C	F	2.4E-06
최대 충전 전압	V	3.50E+04
Charging Power	J/s	1.84E+04
Charging Resistor	Ohm	60
Charging Loss	W	5.51E+01
Min. CCPS Output Power	W	1.84E+04
CCPS Output Power	J/s	2.40E+04
Max. Output Voltage	kV	40
CCPS Efficiency		85%
Total Charging Efficiency		84.7%

바. 트리거 펄스발생기 설계

트리거 펄스발생기는 펄스형성기 용 고전압 스위치의 트리거를 위한 트리거 펄스를 발생시키는 장치이다. 트리거 펄스발생기의 출력 전압은 펄스형성기의 고전압 스위치의 트리거 전압(125 kV) 이상이어야 한다. 본 설계에서는 장치의 크기 및 제작기간을 고려하여 막스(Marx)형태를 사용하였으며 고전압 축전기로는 에너지밀도가 크고, 부품 수급이 용이하며 소형화에 유리한 세라믹 축전기(Murata 사; DHS4E4G202KT2B)를 사용하였다. 축전기의 최대전압이 40 kV이므로 충전전압을 30 kV로 가정할 경우에 출력 전압 125 kV를 고려하면 최소 4 단 이상이 필요하며, 막스의 전압 승압 효율을 70 %로 가정하여 6 단으로 설계하였으며 막스형 트리거 펄스발생기의 설계 파라미터는 Table 4와 같다.

Table 4. Parameters of Marx trigger generator

항목	단위	값
Req. Output Voltage	V	1.25E+05
Charging Voltage	V	3.00E+04
Voltage Effi. @ Open Circuit		7.00E-01
Number of Stages		6
Number Of Capacitors per Stage		4
Element Capacitance	F	2.00E-09
Maximum Charging Energy	J	1.62E+01
Insulation Gas		N2
Trigger Switch		Trigatron
Min. Charging Time	s	8.00E-02
Capacitor Charging Voltage	V	4.00E+04
Charging Rate	W	1.20E+03

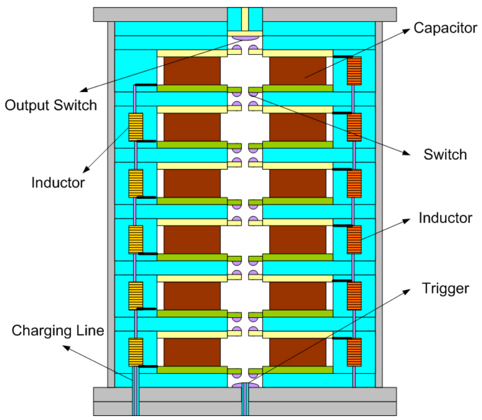

Fig. 11. Marx Trigger Generator

막스전원은 인덕터를 사용하여 충전되는데 인덕터를 사용하면 막스전원의 축전기가 충전될 때에는 낮은 임피던스로 작동하여 충전시의 에너지 손실을 줄일 수 있으며, 방전시에는 반대로 인덕터가 높은 임피던스로 작동되어 단과 단 사이의 분리 기능을 수행한다. 막스전원은 Fig. 11의 형상도와 같이 첫 번째 스위치를 Trigatron으로 사용하여 외부 트리거 신호에 의하여 막스전원이 작동될 수 있도록 하였다.

사. 트리거신호발생기 설계

트리거신호발생기는 장치 운용을 위하여 제어기의 명령에 대하여 출력 펄스를 발생시키기 위한 트리거 신호를 발생시킨다. 트리거신호에 의하여 제어를 받는 모듈은 고전압 충전전원공급기, 펄스형성기의 고출력 스위치, 펄스형성기 충전기, 트리거펄스발생기이다. 따라서 최소 4개 출력 신호를 발생시킬 수 있어야 하며 충방전에 의한 펄스발생 순서에 따라 delay 간격의 조절이 가능하여야 하고 자체 혹은 외부의 명령에 의한 원격 제어가 가능하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 Stanford Research사의 DG535 펄스신호발생기를 사용하였다.

아. 제어기 설계

제어기는 고전압 펄스발생기의 운전상태를 감시 또는 모니터링하며 인터락, 운전제어 등의 기능을 자체적으로 혹은 외부 명령에 따라서 수행하는 기능을 수행한다. 전면부에 터치패널을 부착하여 사용자의 운전명령을 설정할 수 있도록 하였으며, 내부는 각종 신호의 연결 및 제거가 용이하고 순차제어 프로그램이 용이한 Yokogawa 사의 PLC 모듈을 사용하였다.

Fig. 12. Main Screen of Controller

Fig. 12는 제어기의 초기화면으로써 운전설정영역, 인터락영역, 센서영역으로 구분되며 수동 및 원격 운전이 가능하다. 운전설정영역은 충전전압을 위한 Main CCPS의 전압과 트리거전압을 위한 T-Marx CCPS 전압을 제어하며, 인터락영역은 제어기가 자체 점검을 수행하고 이상 유무를 판단하고 표시하는 기능이며, 센서영역은 제어기로 수집된 펄스전원장치의 주요 센서의 값을 표시하여 운전 조건 설정 및 확인이 용이하도록 하였다.

자. 지원장치 설계

고전압, 고출력의 펄스를 다루는 장치는 설계뿐 만 아니라 제작에 더 많은 고려가 되어야 한다. 즉, 고전압에 의한 절연파괴를 방지하기 위한 고진공 구조 설계 및 제작, 이를 위한 진공장치, 절연을 유지하기 위한 절연유 충진과 이를 위한 펄스탱크 설계 및 제작, SF6 가스와 질소가스 등의 기체공급기, 높은 유전율을 가지기 위한 초순수공급장치 등은 장치를 위한 부가적인 요소이면서도 장치 성능을 위해서는 필수적인 요소이다. 또한, 최종적으로 제작된 장치에 대한 고전압, 고출력의 펄스의 성능을 정확하게 계측하기 위해서는 이를 위한 측정 프로브를 설계하였다. 기존의 상용프로브는 본 장치가 요구하는 성능을 만족하지 못하므로 전압을 측정하기 위한 CVP(Capacitive Voltage Probe)와 부하를 위한 물부하(Water Load)를 자체 제작하여 저전압에서 상용프로브를 사용하여 교정을 수행한 후에 교정인자(Calibration Factor)를 산출하여 고전압에서 측정을 수행하였다.

3. 실험결과

Fig. 12와 13은 유도전압합성기를 이용한 다중 펄스 출력 실험구성 및 결과의 일례이다. 부하로는 물부하(Water Load)에 황산구리($CuSO_4$)를 혼합한 용액을 사용하였으며 물부하 양단의 저항을 LCR meter로 측정하여 측정된 황산구리 용액의 저항값이 67 Ω이 되도록 농도를 조정하여 사용하였다. 전압교정은 보상형 저항성 분배기에서 측정된 전압과 상용 전압 프로브에서 측정된 전압 파형을 비교하였고, 전류는 저항성 분배기에 흐르는 전류를 CT(Current Transformer)로 측정한 값과 물부하의 저항과 전압비로 산출된 전류값을 비교하였다. 단펄스 및 반복펄스 실험을 수행하였

으며 상승시간은 30 ns 이내, 출력 전압 500 kV 이상에서 반치전폭 기준으로 60 ns이상, 95 % 펄스폭 기준으로 20 ns 이상의 펄스폭을 얻었다.

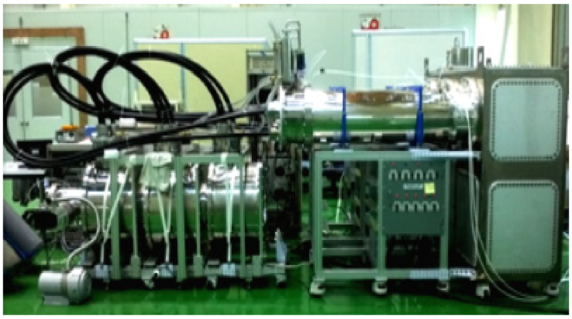

Fig. 13. Experimental Setup of the IVA

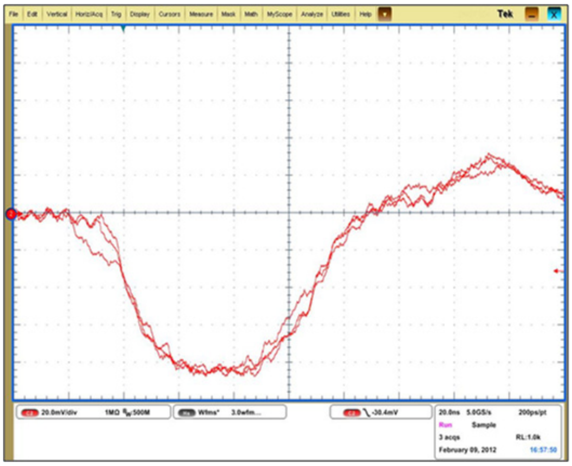

Fig. 14. Typical measured voltage pulse waveform of the Induction Voltage Adder

4. 결 론

본 논문에서는 유도전압합성 방식을 이용한 고출력 펄스전원 장치를 설계하였다. 유도전압합성 방식은 단일 펄스전원으로 구현하기 어려운 고전압의 펄스를 발생시키기 위하여 단일 셀을 다중으로 직렬 연결하여 배수의 출력을 얻을 수 있는 방식으로써 본 연구에서는 200 kV급 단일 셀 3 개를 연결하여 600 kV급의 출력을 절연파괴 없이 구현하였다. 유도전압합성 방식을 이용한 펄스전원 장치는 고전압 펄스를 이용하는 다양한 장치에 활용 가능할 것으로 판단된다.

References

[1] I. D. Smith, "Induction Voltage Adders and Induction Accelerator Family", Phys. Rev. Sp. Top. Accel. Beams, Vol. 7, pp. 64801～64041, 2004.

[2] J. J. Ramirez, K. R. Prestwich, I. D. Smith, "High Power, Short Pulse Generator Based on Induction Voltage Adder", Proceeding of the IEEE, Vol. 80, pp. 946～957, 1992.

[3] H. Heo, O. R. Choi, S. H. Nam, "Design and Evaluation of Water Blumlein Pulse Generator", IEEE Pulsed Power Conference 2011, pp. 1347～1349, 2011.

[4] H. Heo, "Design and Test of Induction Voltage Adder Derived by 3 Blumlein PFLs", IEEE Internatinal Power Modulator and High Voltage Conference 2012.