

펄스형성선로로 구성된 선형유도가속기용 양방향 펄스 전원

박 정 호, 김 종 해, 고 광 철*, 강 형 부*
한양대 대학원 전기공학과, *한양대 전자전기공학부

Bidirectional pulse generator made from pulse forming lines for linear induction accelerator

Jeong-Ho Park, Jong-Hae Kim, Kwang-Cheol Ko, Hyung-Boo Kang
HanYang University

Abstract - Linear induction accelerator devised for high current beam accelerating is divided into two types. In the first type, a unidirectional pulse is injected to an accelerating gap and in the second type, a bidirectional pulse is injected. The purpose of this paper is design and manufacture of bidirectional pulse generator for linear induction accelerator, where the pulse width for acceleration is more than 50 [nsec] and the designed maximum charging voltage is more than 200 [kV].

자 빔을 가속한다.

- 다수의 모듈을 사용함으로써 한 단당 가속 전압은 비교적 작아도 전체로서 필요한 가속 전압을 얻을 수 있다.
- 가속에 전자유도를 사용함으로써 가속갭 이외에는 전계가 나타나지 않아서, 절연설계가 용이하고 장치를 소형화 할 수 있다.
- 다단 가속에 의해 빔 발생원에 대한 인가전압을 작게 할 수 있으므로 발생원에서의 부하가 경감되어 장수명, 고반복이 가능해진다.
- 대전류 펄스 파워 장치로 구동하므로, 대전류 (kA급) 가속기이다.

1. 서 론

대전류의 상대론적 전자빔(Relativistic Electron Beam, REB)의 응용이 확산되고 있는 가운데 100A ~ 1MA 크기의 전류가 요구되는 대전류의 가속용으로서 고안된 것이 선형유도가속기(Linear Induction Accelerator, LIA)이다.

LIA는 크게 Blumlein과 같은 단방향의 펄스 전압을 가속 갭에 인가하는 것과 양방향의 펄스 전압을 인가하는 것으로 나눌 수 있다. 전자의 경우, 분류 인덕턴스를 크게 하기 위해 페라이트와 같은 강한 자성체의 토로이달 코어가 빔 경로를 둘러싸므로 크기, 중량, 가격 면에서 불리하고, 에너지 효율이 저하한다. 후자의 경우, 방향 반전 후에 가속 갭에 인가되는 전압을 빔의 가속에 사용함으로써 출력 전압의 시간적분을 zero로 할 수 있다. 즉, 100%의 에너지 전송 효율이 가능해진다[1].

본 논문에서는 2개의 펄스형성선로로 구성되어 $V_0/2$ 의 양방향 펄스가 출력되는 선형유도가속기를 위한 양방향 펄스 전원의 설계 및 제작을 목적으로 한다.

1.1 선형유도가속기

선형유도가속기의 특징은 다음과 같다.

- 가속의 변화에 의한 유도전계에 의해 하전입

1.2 양방향 펄스를 사용하는 LIA

양방향 펄스를 사용하는 LIA는 Smith에 의해 1979년에 제안되었다[2]. Smith에 의한 전원은 3개의 펄스형성선로로 구성되어 있다. 여기서는 2개의 펄스형성선로로 구성된 것을 이용한다. 그림 1의 양쪽 스위치를 동시에 닫으면, 선로상에는 $V_0/2$ 전압의 오른쪽 진행파와 왼쪽 진행파가 생긴다. 오른쪽 끝은 정합된 전송선로가 연결되어 있기 때문에 반사는 일어나지 않고 오른쪽 진행파는 그대로 전송선로에 흡수된다. 왼쪽 끝은 스위치가 닫혀져 있기 때문에 단락으로서 임피던스가 zero로 보이고 왼쪽 진행파는 극성을 반전해 반사한다. 그 상태가 계속 연결된다. 여기서, T는 양방향 펄스 전파를 구성하는 펄스형성선로의 전기선로 길이이다. 결국, 출력 단에는 그림 1 아래쪽의 전압 파형이 출력된다[3].

2. 양방향 펄스 전원의 설계

2.1 펄스형성선로

동축형의 펄스형성선로의 특성 임피던스는 가속되는 하전입자 빔의 임피던스에 맞춰 설계해야 한다. 그러나, 본 연구에서는 양방향 펄스를 얻는 것이 목적이기 때문에 구체적인 빔을 가속하는 것을

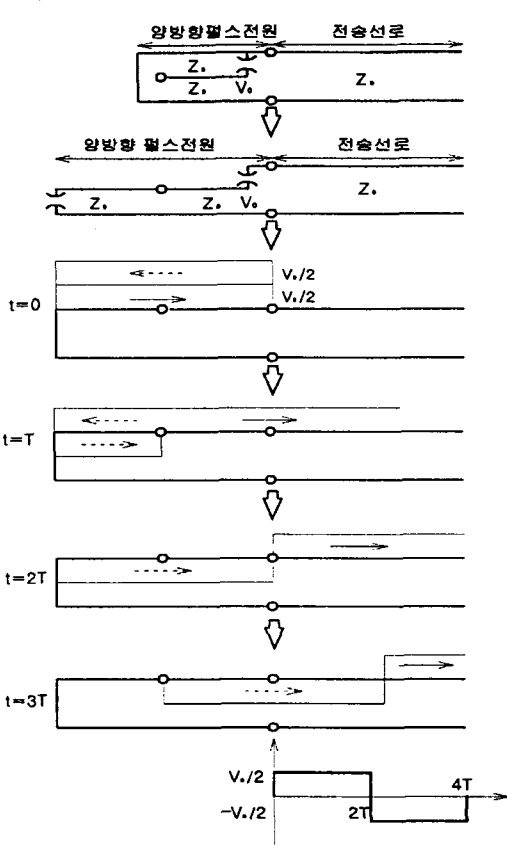


Fig 1. Principle of bidirectional pulse generation

생각하지 않았을 때 가속기의 모의부하로서 약 5Ω으로 설정한다. 중심도체에는 STS 40A 5S, 중간도체에는 STS 100A 5S, 외부도체에는 STS 250A 5S의 스테인리스 강관을 사용했다[4].

물은 유전율이 크고 높은 절연 내력을 가지므로, 선로내의 매질에는 증류수를 사용한다. 이 물은 절연의 자기 회복성이 좋고 값이 싸다. 또, 유전율이 크므로 진행파의 전파속도가 진공중에 비해 약 1/9 정도이므로, 같은 출력 펄스 폭을 얻기 위해서 필요한 펄스 형성 선로의 길이를 짧게 할 수 있다는 이점이 있다[5].

강관의 내반경, 외반경으로부터 각 파라미터는 다음과 같다. 증류수의 비투자율 $\mu_r = 1$, 비 유전율 $\epsilon_r = 80$ 으로 했다.

내측 선로의 특성 임피던스

$$R_1 = 0.05505 \text{ [m]}, \quad r_1 = 0.0243 \text{ [m]}$$

$$L_1 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R_1}{r_1} \approx 0.1636 \text{ [\mu H/m]} \quad (2.1)$$

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{R_1}{r_1}} \approx 5442 \text{ [pF/m]} \quad (2.2)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} 60 \ln \frac{R_1}{r_1} \approx 5.49 \text{ [\Omega]} \quad (2.3)$$

외측 선로의 특성 임피던스

$$R_2 = 0.1303 \text{ [m]}, \quad r_2 = 0.05715 \text{ [m]}$$

$$L_2 \approx 0.1648 \text{ [\mu H/m]} \quad (2.4)$$

$$C_2 \approx 5400 \text{ [pF/m]} \quad (2.5)$$

$$Z_2 \approx 5.53 \text{ [\Omega]} \quad (2.6)$$

2.1.1 펄스 폭

출력되는 양방향 펄스의 시간 폭도, 가속되는 하전입자 빔의 시간 폭에 맞춰서 본래 설계해야 된다. 그러나, 본 연구에서는 양방향 펄스를 얻는 것을 목적으로 하므로, 구체적으로 빔을 가속하는 것을 생각하지 않기 때문에 양방향 펄스의 반파 시간 폭은 약 50[nsec] 이상으로 했다.

길이 L 인 펄스 형성 선로를 진행파가 전파하는 시간을 T 로 놓으면, 출력되는 펄스의 제 1반파, 제 2반파의 펄스 폭은 모두 $2T$ 로 된다. 따라서, $T = 25 \text{ [nsec]}$ 이상의 전기선로 길이가 필요하다. 위의 식으로부터, 선로 내에서의 진행파의 전파속도는 $v \approx 3.35 \times 10^7 \text{ [m/s]}$ 가 되므로

$$L = vT \approx 0.838 \text{ [m]} \quad (2.7)$$

따라서, $L \geq 0.838 \text{ [m]}$ 이면 된다.

2.1.2 선로의 충전시간

물의 체적 저항률 ρ 는 수증의 이온분에 의해서 크게 변화한다. 증류수에서는 $2.5 \times 10^5 \text{ [\Omega m]}$ 이 얻어 지는데, 보통의 수돗물에서는 $1 \times 10^2 \text{ [\Omega m]}$ 정도이다. 여기서 수돗물은 이온교환수지로 처리하여 이온이 존재하지 않는다. 효율이 좋게 충전하려면 충전시간을 짧게, 누설저항 에너지 손실을 작게 하지 않으면 안된다. 누설저항 R 은

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \int_r^R \frac{dr}{2\pi r l} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{R}{r} \text{ [\Omega]} \quad (2.8)$$

가 된다. 따라서, 자연방전의 시정수 T 는

$$T = RC l = \rho \epsilon \approx 7.08 \text{ [\mu sec]} \quad (2.9)$$

가 된다. 충전시간은 이것에 비해 짧은 편이 좋지만, 전기선로 길이보다는 충분히 길지 않다면, 펄스 형성 선로의 전압분포가 각 장소에 일정하게 되어 있지 않기 때문에, 출력 파형이 구형파가 되지 않는 경우가 있다. 일반적으로는, 충전시간을 전기선로 길이의 5배 정도로 하는 경우가 많지만, 여기서는 보다 여유를 두어 7배의 0.175 [\mu sec] 로 한다.

2.1.3 선로의 절연내력

물의 절연 특성은 많은 연구자들에 의해 실험되어졌다. 종종, 실험식이 얻어지고 있다. 그 실험식

은 적용범위가 한정되어지기 때문에 적절한 식을 이용하지 않으면 안된다. 여기서는, 다음과 같은 日新電氣의 실험식을 이용할 수 있다[5].

$$E \cdot t^{0.37} \cdot S^{0.11} = 0.2 \quad (2.10)$$

여기서, E 는 절연파괴 전계강도 [MV/cm], t 는 충전시간 [μ sec], S 는 전극의 표면적이다.

전계가 집중하는 중심도체 면적상에의 절연파괴 전계 E_{BD} 는, $t=0.175[\mu$ sec], $S \approx 1279[\text{cm}^2]$ 일 때 윗식보다는

$$E_{BD} \approx 174 \text{ [KV/m]} \quad (2.11)$$

로 한다. 중심도체 표면적의 실제의 전계 E_{1i} 는 $V_0 = 200 \text{ [KV]}$ 이상으로 충전한다고 가정하면,

$$E_{1i} = V_0 / r \ln \frac{R_1}{r_1} \geq 100 \text{ [KV/cm]} \quad (2.12)$$

가 되고, 충분한 안전계수라고 말할 수 있다. 또, 이때 양방향 펄스의 파고치는 $\pm 100 \text{ [KV]}$ 이상이 된다.

2.2 방전스위치

펄스형성선로의 주방전 스위치에는 가스 절연형 트리가트론 갭을 사용한다. 이것은 고전압 대전류를 향해, 전류의 시작도 빠르고 스위치 시간도 짧은 등의 이점이 있다. 그러나, 펄스의 파형을 결정하는데 스위치의 역할이 중요하므로, 상승시간이 빠르고 지터가 작은 스위치를 설정해야 한다.

2.3 펄스전송선로

펄스형성선로와 부하 사이를 연결한 펄스전송선로는 동축케이블 RG-8/U를 사용했다. RG-8/U의 특성 임피던스는 $52[\Omega]$, 전파시간은 $5[\text{nsec/m}]$ 이다.

2.4 모의부하

실제의 가속 장치에는 펄스형성 선로로 구성되어진 가속 공간이 전송선로에 부하로 접속되어진 것이지만 본 연구에는 순저항을 모의부하로 해서 사용했다.

2.5 펄스형성선로의 설계도

펄스형성선로의 설계도는 그림 2와 같다. 세 개의 스테인리스 강관으로 구성되며, 중간도체의 길이는 다른 도체보다 약간 짧은데 이것의 길이가 변함에 따라 출력 파형이 변한다.

3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 선형유도가속기를 위한 고전압 양방향 펄스 전원을 설계, 제작했다. 유전체로 증류수를 사용한 2개의 펄스형성선로로 구성되고, 특성

임피던스 $5.5[\Omega]$, 펄스 폭(반파) $50[\text{nsec}]$ 이상, 최고출력전압 $\pm 100[\text{kV}]$ 이상이다. 제작한 장치를 이용해 실험을 해서, Bergeron법을 이용한 simulation의 결과와 비교·검토할 예정이다. 양방향 펄스 전원 스위치의 인덕턴스분을 줄임으로서 양방향 펄스의 오버슈트를 개선할 수 있을 것이다.

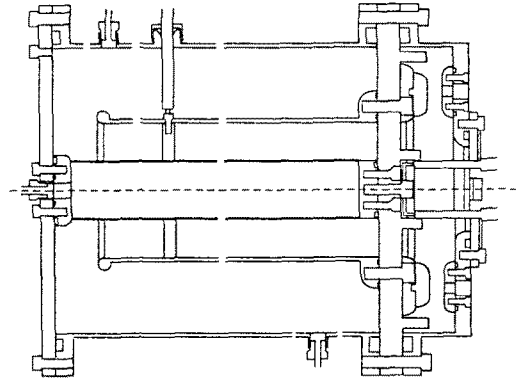


Fig 2. Diagram of pulse forming line

[참고 문헌]

- [1] Eiki Hotta, Masayoshi Abe "Bidirectional Pulsers with High Efficiency for Linear Induction Accelerator", Trans. IEE of Japan, 104-A, 9, 1984
- [2] Ian Smith, "Linear induction accelerators made from pulse-line cavities with external pulse injection", Rev. Sci. Instrum., 50, 714, 1979
- [3] Stanley Humphries Jr., "Principles of Charged Particle Acceleration", John Wiley & Sons, Inc., 1986
- [4] 한국 산업 규격, "배관용 스테인리스 강관", KS D3576, 1994
- [5] 京都ハイパワーテクノロジー研究会, "パルスパワー工学の基礎と應用", 近代科學社, p140, 1992