

펄스파워전원용 고전압 펄스변압기

김종해, 구치욱, 최영욱\*, 이흥식\*, 임근희\*, 고광철\*\*  
 한양대학교 전기공학과, \*한국전기연구소, \*\*한양대 전자전기공학부

High voltage Pulse Transformer for Pulsed Power Supply

Jong-Hae Kim, Chi-Wuk Ku, Y.W.Choi\*, H.S.Lee\*, K.H.Rim\*, Kwang-Cheol Ko  
 Hanyang University, \*Korea Electrotechnology Research Institute.

**Abstract** - Pulse transformers have been developed to apply for pulsed power technology as an alternative of a Marx generator. To obtain repetitive pulsed power generation, it is necessary to observe the rising time of output of pulse transformer. In this paper, using the equivalent circuit, The rising wave of output of pulse transformer is simulated for various input wave by using the Electromagnetic transient program(EMTP).

1. 서 론

시·공간적 에너지의 압축 기술인 펄스파워기술은 최근 환경문제가 대두되면서 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 고효율의 배기가스처리나 플라즈마를 이용한 폐기물 처리를 위해 펄스파워를 사용한다. 그리고 대전류의 가속용으로 고안된 선형유도가속기의 전원으로도 사용된다. 이 펄스파워전원을 위한 고전압 발생장치로는 일반적으로 Marx 발생기를 많이 이용하지만, 절연확보를 위해서는 장치가 커질 뿐만 아니라, 콘덴서와 스위치의 인덕턴스 성분들은 방전파형에 영향을 크게 미치며, 충전시간을 포함하여 고반복에 적합하지 않다. 이러한 이유로 펄스변압기를 사용하는 것이 필요하다.

고반복의 펄스파워장치를 만들기 위해서는 펄스파워전원에서 빠른 전달이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 40/400[kV], n=10인 펄스변압기를 이용하여 PFN을 충전할 때, 펄스변압기 출력 전압파형을 EMTP를 이용하여 모의하고, 상승시간을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 펄스형성선로(PFL)

본 논문에서는 충전을 위한 펄스변압기를 다룰 것이므로, 간단한 펄스형성선로를 이용할 것이다.[1]

2.1.1 펄스형성선로 사양

- 반경비  $R/r=1.8$
- 외측관 반경  $R=39.4$  [cm]
- 내측관 반경  $r=21.9$  [cm]
- 선로장  $l=39.1$  [cm]
- 임피던스  $Z=3.92$  [ $\Omega$ ]
- 인덕턴스  $L=117.6$  [nF/m]
- 커패시턴스  $C=7.67$  [nF/m]
- 최대전계강도  $E=77.7$  [kV/cm]

2.2 펄스변압기

펄스변압기는 정상상태에서 일반적으로 이용되는 변압기와는 달리 과도상태에서의 응답이 중요하다. 고전압·대전류에서의 사용에 앞서 장치의 안정성에 특별한 주의를 요한다. 한편, 포화 자속문제가 있어서 공심변압기를

사용하는 경우가 많지만, 1차와 2차의 결합을 크게 하고 여자전류를 작게 하여 변압기의 손실을 낮게 할 목적으로 METGLAS 2605CO를 사용한다.

2.2.1 변압기 사양

- 변압기의 사양은 아래와 같다.
- 평균자로 길이( $l$ ) 216 [cm]
- 코어의 단면적( $S$ ) 86.6 [cm<sup>2</sup>]
- 권선의 길이( $\mathcal{L}$ ) 30.5 [cm]
- 권선부분의 평균반주( $u$ ) 81.7 [cm]

코어의 재료는 METGLAS 2605CO이고, 포화자속 밀도는 약 1.8 [Wb/m<sup>2</sup>]이다. 비유전율은 d-c특성에서 1200이다.

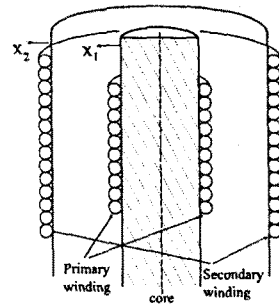


그림 1. 권선 구조

2.2.2 누설인덕턴스[2]

변압기의 누설인덕턴스는, 1차와 2차 권선 사이에 발생하는 자계중에 축적되는 자기 에너지를 계산하는 방법을 이용하였다.  $x_1$ 은 1차 권선의 안쪽 면으로부터의 거리이고,  $x_2$ [m]는 2차권선의 안쪽 면으로부터의 거리이다. 1차권선 내부의 자계  $H_1$ 은

$$H_1 = \frac{N_1 I_1}{\mathcal{L}} \frac{x_1}{a_1} \quad [\text{A/m}]$$

2차권선 내부의 자계  $H_2$ 는

$$H_2 = \frac{N_2 I_2}{\mathcal{L}} \left(1 - \frac{x_2}{a_2}\right) = \frac{N_1 I_1}{\mathcal{L}} \left(1 - \frac{x_2}{a_2}\right) \quad [\text{A/m}]$$

이다. 여기서  $l$ 은 축방향의 권선 길이이고,  $a_1, a_2$ 는 각 층의 두께이다. 1차와 2차권선 사이의 자계  $H_3$ 는

$$H_3 = \frac{N_2 I_2}{\mathcal{L}} = \frac{N_1 I_1}{\mathcal{L}} \quad [\text{A/m}]$$

이다. 그러므로 누설자계중에 저장되는 전체에너지는

$$W = \frac{\mu\mu_0}{2} \left( \int_0^{a_1} H_1^2 dx_1 + \int_0^{a_2} H_2^2 dx_2 + H_3^2 \Delta \right)$$

$$= \frac{\mu\mu_0 N_1^2}{2L} \left( \Delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \quad [J]$$

이다.  $W = \frac{1}{2} L_L I_1^2$ 에 의해서, 누설인덕턴스  $L_L$ 은

$$L_L = \frac{\mu\mu_0 N_1^2}{L} \left( \Delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

$$= 4.38 \quad [\mu H]$$

이다. 여기서  $a = 0.7$  [cm]이고,  $\Delta = 14$  [cm]이다.

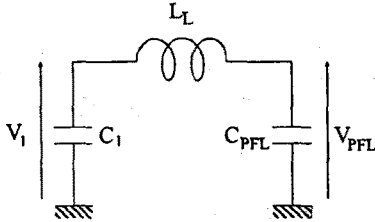


그림 2. 충전회로

### 2.2.3 변압기의 권수비

본연구에서는 비유전율이 높은 코어를 사용함으로써 결합계수가 충분히 1에 근접하도록 한다. 변압기의 1차에서 2차까지 에너지전송을 최대로 하는 것은, 2차를 1차로 환산했을 때, 1차측 콘덴서 전압은 시간에 의존하고, 1차 2차간 인덕턴스를  $L$ 로 하면,

$$V_1(t) = V_0 \left( 1 - \frac{1 - \cos \omega t}{\omega^2 L C_1} \right)$$

로 표시한다. 단방향 PFL의 전압은

$$V_{PFL}(t) = \frac{V_0}{\omega^2 L C_{PFL}} (1 - \cos \omega t)$$

로 나타난다. 여기서  $\omega$ 는 회로의 공진주파수이고,

$$1/\omega = \left( \frac{L C_1 C_{PFL}}{C_1 + C_{PFL}} \right)^{1/2}$$

이다. 위 식에서 1차측 콘덴서에서 PFL까지의 에너지 전송효율  $\eta$ 는

$$\eta = \left( \frac{C_{PFL} V_{PFL}^2 / 2}{C_1 V_0^2 / 2} \right) = \frac{4 C_1 C_{PFL}}{(C_1 + C_{PFL})^2}$$

이다. 그러므로,  $C_1 = C_{PFL}$ 일 때 에너지 전송효율이 최대에 이른다는 것을 알 수 있다.

변압기의 권수를 각각  $N_1, N_2$ 로 하면, 그 권수 비로부터 에너지 전송효율이 최대가 되는  $C_1$ 은 다음과 같이 할 수 있다.

$$C_1 = C_{PFL} \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

1차측에서 2차측까지의 공진충전주기  $T$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$

$$= 2\pi \sqrt{L_L C_1 / 2}$$

$$= 1.70 \times 10^{-7} \times N_2 \quad [s]$$

주기를 5 [ $\mu s$ ]로 하면  $N_2$ 는 30이 된다.

### 2.2.4 코어의 포화

코일에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속  $\phi$ 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{\mu N I S}{l}$$

여기서,  $N$ 은 권수,  $S$ 는 코어의 단면적,  $l$ 은 코어의 자로 길이이다. 변압기에 인가된 전압이 단형파(전압  $V$  at  $0 \leq t \leq T/2$ )이면, 발생하는 최대 자속은 다음과 같다.

$$\phi_m = \frac{1}{N} \int v dt$$

$$= \frac{VT}{2N}$$

그리고, 인가된 전압이 sin파이면, 최대자속밀도는

$$\phi_m = \frac{1}{N} \int_0^{T/4} V_0 \cos \frac{2\pi}{T} t dt$$

$$= \frac{V_0 T}{2N\pi}$$

이다. 코어의 포화자속  $\phi_s$ 는

$$\phi_s = B_s S = 1.8 \times 86.6 \times 10^{-4} = 1.55 \times 10^{-2} \quad [Wb]$$

이다. 위 식들에 의해 PFL에 충전 가능한 최대 전압  $V_{PFLmax}$ 를 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

$$\phi_m < \phi_s$$

$$\frac{V_0 T}{2N\pi} < 1.55 \times 10^{-2}$$

$$\frac{1.7 \times 10^{-7} \times N_2}{2N_1 \pi} V_0 < 1.55 \times 10^{-2}$$

$$V_{PFLmax} < 573 \quad [kV]$$

그러므로, 400 [kV]까지 충분히 충전할 수 있다.

### 2.2.5 여자전류

이상적인 변압기는 코어의 비유전율이 무한대이며, 인가전압에 쇄교하는 역기전력을 유도하기 위해 필요한 자속을 만드는 여자전류는 없다고 가정한다. 그러나 실제 주자속을 만들기 위한 기자력  $F = NI$ 을 필요로 한다.  $I$ 을 여자전류라 한다. 여자전류의 포화 한계치는 다음과 같다.

$$B = \mu H = \mu \frac{N_1 I'}{l} < 1.8$$

$\mu = 1200$ 이므로

$$N_1 I' < 2.58 \times 10^3 \quad [A \cdot T]$$

이 된다. 코어가 포화하는 것은  $N_1 = 3$ 일 때 최대 값  $I' = 0.86$  [kA]이다. 단방향, 1차측의 콘덴서 충전전류의 최대치는 다음 식에 의해 계산된다.

$$I_{1max} = \sqrt{\frac{C_1 / 2}{L_L}}$$

$$= 5.55 \times 10^{-2} \frac{N_2}{N_1^2} V_1$$

$N_1 = 3, N_2 = 30, V_1 = 40$  [kV]라면,  $I_{1max} = 7.4$  [kA]를 얻을 수 있다. 그러므로, 여자전류는 방전전류의 약 1/8~1/9이라는 것을 알 수 있다.

### 2.3 EMTP를 이용한 simulation

EMTP(Electromagnetic Transient Program)는 Bergeron법을 이용해 만든 모든 전력계통 구성요소를 포함한 전력계통용 과도현상해석 프로그램이다(3). EMTP의 초기 목적은 전력계통의 서지 현상만을 분석하기 위한 것이었으나, 이후 동기발전기, 싸이리스터, 제어계, 회전기기의 모델이 추가되었으며 터빈발전기의 SSR(Sub Synchronous Resonance)모델과 교류-직류 변환기 및 고조파 해석까지 할 수 있는 기능이 보장되어 범용성이 풍부하다.

#### 2.3.1 EMTP 모델링

펄스변압기의 등가회로도 일반적인 변압기와 마찬가지로

[참고 문헌]

[1] Stanley Humphries Jr., "Principles of Charged Particle Acceleration", John Wiley & Sons, Inc., 1986  
 [2] G.N.Glasoe and J.V.Lebacz, "Pulse Generators", Dover Publication, Inc., NY, 1965  
 [3] H.W.Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE, on Power Apparatus and Systems, PAS-88, 388, 1969

로 누설인덕턴스를 이용하여 나타낸다.  $0.1[\mu F]$ 의 커패시터를 1차측의 입력전원으로 하고, PFL은 충전장치와 마찬가지로 커패시턴스 값을 고려하여 2차측에  $C_{PFL}$ 를 1차측으로 환산하여 나타내었다. 충전시간은  $1.7[\mu s]$ 로 하였다.

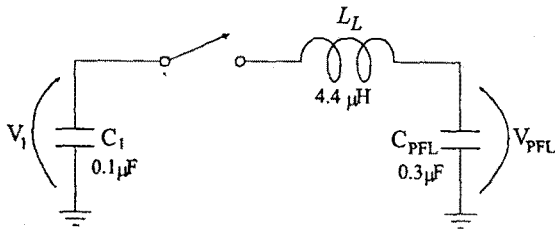


그림 3. 펄스변압기를 이용한 PFL의 충전 등가회로

그림 4는  $C_1 = C_{PFL} = 0.3[\mu F]$ 일 때의 파형이고, 충전시간은  $2.5[\mu s]$ 이다. 이 경우 효율은 거의 100%이다. 그러나 그림 5는 실제로 이용한 입력커패시터  $C_1 = 0.1[\mu F]$ ,  $40(kV)$ 를 이용한 파형이다. 충전시간은  $1.7[\mu s]$ 이다.

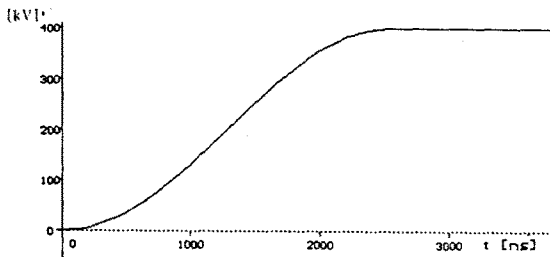


그림 4. 출력부분의 충전전압파형

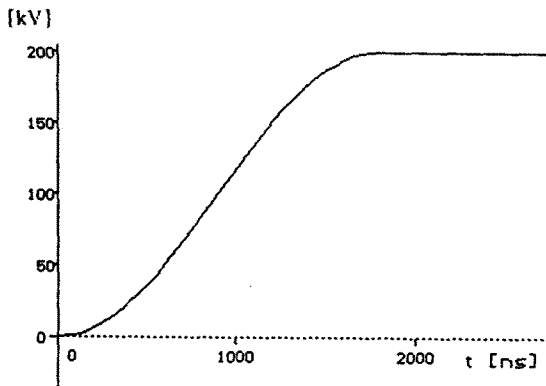


그림 5. 출력부분의 충전전압파형

3. 결 론

펄스변압기를 이용하여 PFL을 충전할 때 입력커패시터가 변압기 출력부분의 PFL의 C값과 같을 경우에는  $2.5[\mu s]$ 의 충전시간에 거의  $400(kV)$  출력을 얻었지만, 충전 커패시터 값이 작을 경우 출력전압이 줄어들지만, 출력전압의 상승시간은 줄어들었다. 충전시간을 줄이고, 펄스 반복시간을 줄이기 위해서는 펄스변압기의 누설인덕턴스를 줄이도록 설계되어야 할 것이다. 그리고 커패시턴스 값이 되도록 같게 되어야 할 것이다.