

자속압축발전기와 퓨즈개방스위치를 이용한 고전압펄스 발생

국 정현, 김 진기, 이 은수
국방과학연구소

High-Voltage Pulse Generation by Using Flux Compression Generator and Fuse Opening Switch

Kuk Jeong-Hyeon, Kim Jin-Gi, Lee Eun-Soo
Agency for Defense Development

Abstract - 이 논문에서는 코일의 구조가 변압기형태인 나선형 자속압축발전기, 캔칭매질인 SiO₂ 분말과 동선으로 제작한 퓨즈개방스위치, 두 개의 전극으로 간단하게 만든 스파크 갭 스위치 그리고 수저항 모의부하로 이루어진 대전류 고전압 펄스발생 시스템을 제작하고 출력특성을 분석하였다. 실험결과, 축전기로부터 공급한 364J의 초기에너지를 나선형 자속압축발전기로 증폭을 하고 최대 출력전류에서 퓨즈개방스위치가 동작하여 120Ω의 수저항에 펄스상승시간이 56ns이고, 펄스폭이 0.1μs인 180kV의 고전압펄스를 인가하였다.

1. 서 론

대전류 고전압 펄스파워 시스템은 일반적으로 초기전원, 축전기나 인덕터와 같은 전기에너지 저장장치, 개방/단락스위치, 변압기 그리고 부하로 구성된다. 축전기나 인덕터를 사용하는 전기에너지 저장장치는 시스템이 크고 무거우므로 이동사용에 제약이 따르고, 무엇보다 사용빈도가 낮거나 일회성인 경우에 목적대비 비용지출이 과다하게 된다. 이와 같은 응용분야에서 전기에너지 저장장치로 자속압축발전기(Flux Compression Generator, FCG)를 사용할 수 있다.

자속압축발전기는 화학의 폭발력을 이용하여 초기에 공급한 전기에너지를 증폭하는 일종의 발전기[1]로 화학을 에너지원으로 사용하기 때문에 축전기나 인덕터와 비교하여 에너지밀도가 높고 에너지의 방출속도가 빠르며 제작비용이 저렴하다. 그러나 자속압축발전기는 유도성 부하에 대전류를 출력하는 특성이 있지만 상대적으로 낮은 전압을 출력하므로 대부분의 응용분야에서 개방/단락스위치와 변압기 등으로 구성된 전력조정장치를 필요로 하고 화학을 사용기 때문에 반복적 사용이 어려우며 화학폭발에 의한 위험요소의 방지가 필요하다.

자속압축발전기로 고전압펄스를 발생시키기 위해서는 저장 인덕터와 개방스위치가 필요하다. 자속압축발전기의 출력에너지는 개방스위치를 통하여 인덕터에 저장되고 개방스위치가 작동되면 대전류는 고전압펄스로 변환되어 직접 또는 필요에 따라 변압기를 거쳐 부하로 전달된다.

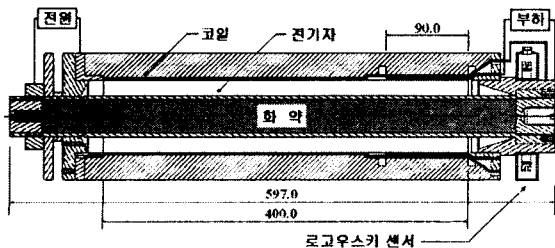
자속압축발전기의 전력을 조절하기 위해 사용하는 개방스위치는 퓨즈개방스위치(Fuse Opening Switch, FOS 또는 Electrically Exploding Opening Switch, EEOS)와 화학개방스위치(Explosively Formed Fuse Opening Switch, EFF 또는 EOS)가 있다[2]. 퓨즈개방스위치는 스위치를 동작시키기 위한 외부의 추가적 장치가 필요치 않아 구조가 간단하고, 개방시간이 빠른 반면에 에너지의 손실이 크고, 동작시간을 정확히 조절하기 어렵다. 화학개방스위치는 대용량의 전류를 수용할 수 있고 동작시간을 편리하게 조절할 수 있으나 퓨즈개방스위치에 비하여 구조가 복잡하고, 개방시간이 느리다.

본 연구에서는 코일의 구조가 변압기형태인 나선형 자속압축발전기, 동선으로 제작한 퓨즈개방스위치, 두 개의 전극으로 만든 스파크 갭 스위치 그리고 황산구리로 제작한 수저항을 모의부하로 하는 대전류 고전압 펄스발생 시스템을 제작하고 출력특성을 분석하였다.

2. 고전압 펄스발생 시스템의 제작

2.1 자속압축발전기

본 연구에 사용한 자속압축발전기의 설계도를 <그림 1>에 도시하였다. 전원으로부터 자속압축발전기에 전류가 공급되면 코일과 전기자 사이에 자속이 형성되고, 화학의 폭발로 전기자가 팽창하여 코일과 접촉해 가변 자속의 시간적 변화에 의해 유도성 부하에 증폭된 전기에너지를 공급한다.



<그림 1> 자속압축발전기의 설계도.

<그림 1>에서 자속압축발전기의 인덕턴스를 L_G, 회로의 저항을 R, 부하의 인덕턴스를 L_{Load}로 표기하면 전기자가 팽창하여 코일과 접촉할 때의 회로는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} + IR = 0 \tag{1}$$

여기서, L=L_G + L_{Load}이다. 식 (1)의 양변에 I를 곱하여 정리하면

$$-\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dt} = RI^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} LI^2 \right) \tag{2}$$

을 얻는다. 식 (2)의 왼쪽 항은 시간에 따른 인덕턴스의 변화에 의해 생성되는 에너지가 나타내며, 오른쪽 첫째 항은 회로의 저항에 의해 소모되는 에너지, 두 번째 항은 회로에 저장되는 전기에너지의 시간변화율을 나타낸다. 자속압축발전기를 사용하여 전기에너지를 증폭하기 위해서는 오른쪽 두 번째 항의 값이 0보다 커야 한다. 즉, 다음과 같은 저항과 인덕턴스의 관계가 성립되어야 한다.

$$-\frac{dL}{dt} > 2R \tag{3}$$

자속압축발전기를 설계하고 제작할 때에 한 가지 더 고려해야 할 사항은 자속의 시간변화에 따라 자속압축발전기 내부에 유도되는 전압이다. 자속압축발전기 내부에 유도되는 전압은 설계에 따라 수에서 수십 kV에 달하므로 코일과 전기자 사이에 전압강하가 발생하지 않도록 적절히 절연을 하여야 한다.

위에 언급한 기준을 고려하여 설계한 자속압축발전기의 전기자는 외경이 46, 내경이 37mm이고, 코일의 설계변수는 <표 1>과 같다.

<표 1> 자속압축발전기의 설계변수.

구분	코일의 규격					
	구획 번호	피치 (mm)	길이 (mm)	코일내경 (mm)	선경 (mm)	선수
1차코일	1	3.0	72	80	1.15	1
	2	4.0	61	80	1.83	1
	3	7.4	75.6	80	1.83	2
	4	14.8	101.4	80	1.83	4
	5	30.0	90	86	1.83	8
2차코일	1	20.0	20	80	1.48	1
	2	3.0	70	80	1.48	1

2.2 퓨즈개방스위치

자속압축발전기의 출력에너지에 의해 동작하는 퓨즈개방스위치의 금속퓨즈(도체선이나 도체박막)의 크기는 다음과 같이 결정할 수 있다[3].

$$A = k_1 I_m \left(\frac{\tau}{2Y} \right)^{1/2} \tag{4}$$

식 (4)에서 A는 금속퓨즈의 단면적, k₁는 동선에 대해 2.8×10⁻⁹, I_m는 금속퓨즈가 기화를 시작하는 전류, τ는 자속압축발전기의 동작시간, Y는 자속압축발전기의 전류파형이 I(t)=I_i·exp(-t/τ)일 때의 지수인자, I_i는 자속압축발전기에 공급한 초기전류이다.

$$l = \alpha k_2 \phi_0 \left(\frac{\tau}{2Y} \right)^{-1/2} \tag{5}$$

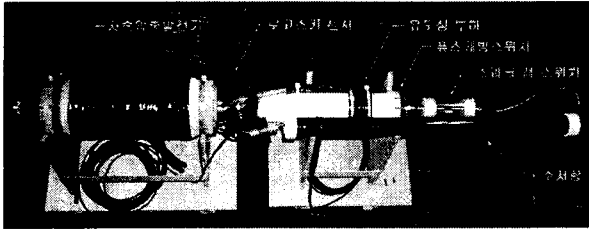
식 (5)에서 l는 금속퓨즈의 길이, α는 전체 에너지에 대한 소산되는 에너지의 비율로 0.63 ≤ α ≤ 1.0, k₂는 동선에 대해 3.3×10⁻³, φ₀는 금속퓨즈가 기화를 시작하는 자속이다.

본 연구에서는 유사한 자속압축발전기와 유도성 부하를 사용하여 출력특성 분석실험을 실시하고, 실험의 안정성을 고려하여 퓨즈의 크기를 결정하였다. 실험에 사용한 퓨즈는 직경 0.051, 길이 300mm인 30가닥의 동선으로 퓨즈 양단의 전압강하를 방지하기 위하여 SiO₂ 분말을 채워 넣었다.

2.3 기타

대전류 고전압 펄스발생 시스템의 조립사진을 <그림 2>에 나타내었다. 그림에서 스파크 갭 스위치는 자속압축발전기의 동작동안 모의부하에 전압을 인가하지 않다가 퓨즈개방스위치가 동작하여 일정전압 이상이 되면 펄스전압을 인가하기 위해 사용하였다. 스파크 갭 스위치의 전극간격은 자속

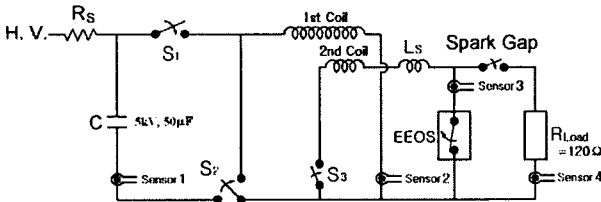
압축발전기의 출력전압을 고려하여 16mm로 정하였다. <그림 2>에서 수저항은 120Ω이며 황산구리용액과 아크릴 관을 사용하여 제작하였다.



<그림 2> 고전압 펄스발생 시스템의 사진.

3. 실험방법

<그림 2>에 나타난 고전압 펄스발생 시스템의 등가회로도를 <그림 3>에 도시하였다. 그림에서 1차코일과 2차코일은 자속압축발전기를 나타내며, 초기전류는 5kV, 50μF인 축전기와 상용 스위치 S₁을 사용하여 공급하고 방전전류는 상용 센서1로 기록하였다. 자속압축발전기의 전기자와 코일의 접촉을 나타내는 스위치 S₂는 최대 초기전류에서 동작하도록 시간지연장치를 사용하여 화약기폭시간을 조절하였고, 스위치 S₃은 화약의 폭발이 순차적으로 진행하여 1차코일의 출력이 최대가 될 때 코일과 전기자가 접촉하여 자동적으로 동작한다. 자속압축발전기 2차코일이 동작을 시작하여 전기 에너지가 증폭되면 퓨즈개방스위치의 퓨즈가 기화하면서 저항이 급격하게 증가하여 퓨즈개방스위치 양단에는 L_s·dI/dt에 해당하는 고전압이 발생한다. 퓨즈개방스위치 양단전압이 스파크 갭의 설정전압보다 높아지면 스파크 갭 스위치가 동작하고 모의부하에 고전압펄스를 인가한다. 자속압축발전기 1, 2차코일과 모의부하에 흐르는 전류는 자체적으로 제작하고 보정한 센서2에서 4의 로고스키 코일에 의해 오실로스코프에 기록되었다.



<그림 3> 고전압 펄스발생 시스템의 등가회로도.

4. 실험결과 및 논의

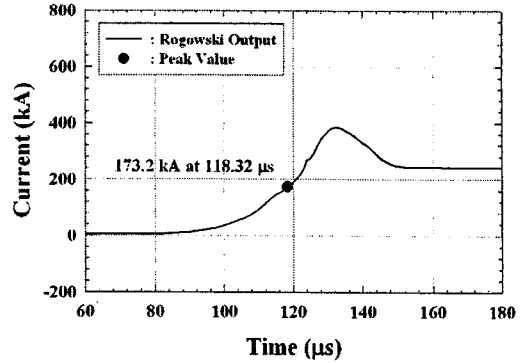
본 연구에서 수행한 고전압 펄스발생 시스템의 특성분석결과를 <표 2>에 정리하고, 자속압축발전기 1차와 2차코일 그리고 수저항에 흐르는 전류파형을 <그림 4>에서 <그림 6>에 도시하였다. <표 2>에서 120 Ω의 수저항에 공급된 최대 전류는 1.5kA이고 수저항에 인가된 고전압펄스의 피크는 180kV이다. <그림 6>에서 수저항에 인가된 고전압펄스의 상승시간은 56ns이고 펄스폭은 0.1μs이다.

실험결과로부터 유도성 부하에 저장된 자속은 유도성 부하의 인덕턴스와 전류로부터 $\phi_0 = 17.3 \cdot 10^3 \cdot 2.52 \cdot 10^{-6} = 43.6 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 로 계산된다. 그러나 유도성 부하에 저장된 자속을 고전압펄스의 전압과 펄스폭을 사용하여 계산해 보면 $\phi_0 = U_m \cdot \Delta t = 180 \cdot 10^3 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} = 18 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 로 두 값에 차이가 크다. 이러한 원인은 수저항에 설치한 로고스키 센서의 출력을 오실로스코프로 기록할 때에 펄스폭이 긴 다른 로고스키 센서와 동일한 샘플링 비율로 설정함에 따라 데이터의 손실로 인하여 수저항에 인가된 전압이 낮아진 때문이다. 따라서 수저항에 인가된 고전압펄스는 180kV보다 클 것으로 판단된다.

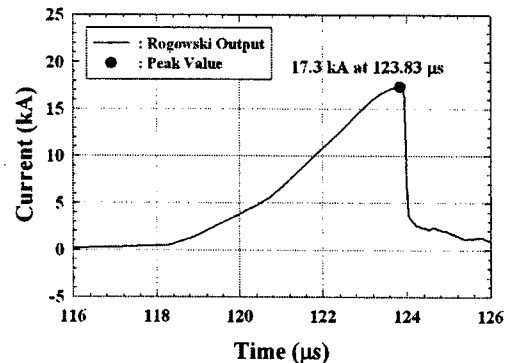
본 실험에 앞선 예비시험에서 자속압축발전기 2차코일의 동작시간은 10μs이었으나 <그림 5>를 보면 자속압축발전기 2차코일과 전기자가 접촉한 후 대략 6μs에 퓨즈가 개방되었음을 알 수 있다. 이러한 사실은 자속압축발전기의 출력에너지를 퓨즈개방스위치가 충분히 활용하지 못했음을 의미한다. 따라서 수저항 모의부하에 더 높은 전압을 인가하고, 에너지전달을 높이기 위해서는 퓨즈개방스위치의 동선규격을 최적화할 필요성이 있다.

<표 2> 고전압 펄스발생 시스템의 특성분석결과.

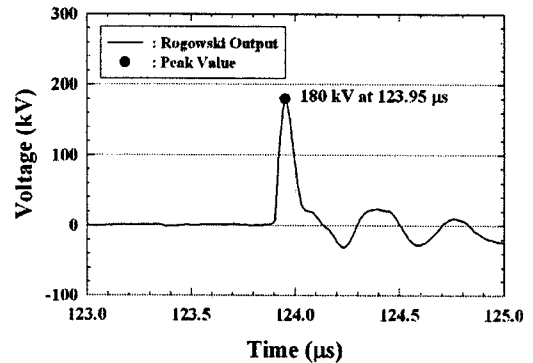
인덕턴스 (μH)			수저항 (Ω)	전류 (kA)				수저항 인가전압 (kV)	고전압 펄스의 상승시간 (ns)
FCG		L _s		입력	1차 코일	2차 코일	수저항		
1차 코일	2차 코일								
45.55	28.64	2.52	120.0	4.0	173.2	17.3	1.5	180.0	56



<그림 4> 자속압축발전기 1차코일의 전류출력파형.



<그림 5> 자속압축발전기 2차코일의 전류출력파형.



<그림 6> 수저항에 인가된 고전압 펄스파형.

5. 결 론

코일의 구조가 변압기형태인 나선형 자속압축발전기, 퓨즈개방스위치, 스파크 갭 단락스위치 그리고 수저항으로 구성된 대전류 고전압 펄스발생 시스템을 제작하여 출력특성을 분석하였다. 실험결과로부터 자속압축발전기와 퓨즈개방스위치를 사용하여 고 인피던스 부하에 적합한 수백 kV의 고전압 펄스를 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 시스템은 사용빈도수가 매우 낮고, 시스템의 크기에 제한이 있으며 이동성이 보장되어야 하는 경우에 경제적으로 사용할 수 있다.

향후 연구에서는 자속압축발전기와 퓨즈개방스위치의 규격을 최적화하는 기법과 고전압 펄스발생 시스템의 모의부하인 수저항을 실제 응용가능한 장치로 대체한 실험을 수행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] L. Altgilbers, M. Brown, I. Grishnaev, B. Novac, I. Smith, I. Tkach, and Y. Tkach, Magnetocumulative Generators, New York: Springer-Verlag New York Inc., 2000.
- [2] Eds. A. Guenther, M. Kristiansen, and T. Martin, Opening Switch, Plenum Press, New York and London, 1987.
- [3] R. E. Reinovsky, J. H. Goforth, I. R. Lindemuth, and H. Oona, High Power Opening Switches for Flux Compression Generator Applications_An Overview", LA-UR-89-1984, 1989.