서브 나노초 상승시간의 고전압 펄스 발생용 피킹 스위치

A Peaking Switch to Generate a High Voltage Pulse of Sub-nanosecond Rise Time

노영수[†] · 진윤식^{*} · 조주현^{*} · 임수원^{**}
(Youngsu Roh · Yun-Sik Jin · Chuhyun Cho · Soowon Lim)

Abstract - A triaxial Blumlein pulse forming line has been designed to generate a pulse whose voltage is ~ 300 kV, pulse duration is ~ 5 ns, and rise time is ~ 500 ps. It turns out, however, that the rise time of the pulse becomes much longer than 500 ps due to parasitic inductances and capacitances existing inside the system. A peaking switch has been developed to shorten the rise time of the pulse from Blumlein pulse forming line. In the peaking switch, a wedge-shaped dielectric material (MC 901 nylon) is employed to surround the electrode on the antenna side. This shape inhibits an abrupt change of the output impedance, thereby minimizing the reflection of the output pulse. Experimental results show that the peaking switch is capable of improving the rise time of the pulse at a level of 500 ps.

Key Words : Blumlein, Pulse forming line, Rise time, Peaking switch, Impedance

1. 서 론

블룸라인 펄스 성형라인(블룸라인 PFL : Blumlein Pulse Forming Line)은 매우 짧은 폭($\sim$ 수 ns)의 사각형 고전압 펄스를 발생시킬 수 있으므로 다양한 펄스 파워(Pulse Power) 응용분야에서 고전압 펄스 발생장치에 이용되었다[1-2]. 최근 초광대역(UWB : Ultra Wide Band) 전자기 펄스(EMP : Electromagnetic Pulse)가 전자 및 전력 기기에 미치는 영향에 대한 관심이 고조되고 있다[3-4]. 이 추세에 맞추어 블룸라인 PFL을 이용한 실험실 규모의 UWB EMP 발생장치가 개발되었다[5].

이상적인 블룸라인 PFL에서는 이론적으로 완벽한 사각형 펄스가 발생될 수 있으며 펄스폭은 블룸라인 PFL의 길이와 유전체의 유전상수에 의하여 정해진다[6]. 그러나 실제의 블룸라인 PFL에서는 스파크 갭 스위치, 충전용 인덕터 등과 같은 구성 요소와 연관된 기생 인덕턴스와 기생 커패시턴스가 불가피하게 존재한다. 이것들로 인하여 블룸라인 PFL의 출력은 사각형 형태가 되지 못하고 유한한 상승시간을 가진 펄스가 된다[7]. 상승시간은 펄스의 주파수 대역을 결정하는 중요한 인자이며 상승시간이 짧을수록 주파수 대역에서 고주파수 성분이 증가하게 된다. UWB 고전압 펄스를 얻기 위해서는 상승시간이 매우 짧아야 하지만 고전압 장치의 특성상 장치 내부에 존재하는 기생 인덕턴스와 커패시턴스를 제거하여 원하는 상승시간을 얻은 것은 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 피킹 스위치(Peaking Switch)를 이용하여 길어진 펄스의 상승시간을 단축한다[7].

본 논문에서는 UWB EMP 방사용 안테나에 인가되는 고전압 펄스에 요구되는 상승시간을 얻기 위하여 블룸라인 PFL과 안테나 사이에 피킹 스위치를 삽입하였다. 본문에서 제작된 피킹 스위치의 설계의 주안점과 동작특성에 대해서 기술한다. 특히 피킹 스위치 전후에서 임피던스 정합을 위한 구조와 피킹 스위치에 의하여 상승시간이 개선된 결과에 대해서 논의한다.

2. 피킹 스위치의 설계 및 제작

2.1 고전압 UWB EMP 발생기

그림 1은 이 논문에서 취급하는 고전압 UWB EMP 발생기의 개념 설계도를 나타낸다. 이 시스템에 대한 설명은 참고문헌[5]에 자세히 기술되어 있으므로 이 절에서는 주요 구성장치에 대하여 간략히 언급하고 주로 피킹 스위치에 대하여 논의한다. 이 시스템은 충전회로, 블룸라인 PFL, 그리고 UWB EMP 방사용 안테나로 구성되어 있다. 충전회로의 출력은 펄스 변압기를 통하여 최대 300 kV로 승압되어 블룸라인 PFL에 충전된다. 블룸라인 PFL의 주 스위치가 닫히면 펄스 성형이 시작된다. 블룸라인 PFL은 출력이 최대전압 300 kV, 펄스폭 5 ns의 펄스가 되도록 설계되어 있다. 그러나 3장 실험결과에서 설명되어 있는 바와 같이 블룸라인 PFL은 출력 파형의 상승시간은 상당히 길게 나타난다. 이 출력이 직접 안테나에 인가되는 경우 설계에서 기대되는 방사 신호의 주파수 대역을 얻을 수가 없다. 왜냐하면 안테나에 인가되는 펄스의 상승시간은 발생하는 UWB 신호의 주파수 스펙트럼과 밀접한 관계가 있으며, 상승시간이 짧을수록 신호의 고주파수 성분이 증가되기 때문이다. 앞에서 언급한 바와 같이 시스템 내부에 존재하는 기생 인덕턴스 및 커패시턴스로 인하여 블룸라인 PFL은 출력 펄스의 상승시간은 길어지게 된다. 이 기생 인덕턴스 및 커패시턴스를 완전히 제거하는 것은 불가능하므로 일반적으로 상승시간을

* 정 회 원 : 한국전기연구원 책임연구원

** 정 회 원 : 한국전기연구원 연구원

[†] 교신저자, 정회원 : 숭실대학교 전기공학부 부교수

E-mail : yroh@ssu.ac.kr

접수일자 : 2012년 7월 30일

최종완료 : 2012년 8월 21일

단축시키기 위하여 피킹 스위치가 이용된다. 따라서 본 논문에서는 원하는 상승시간의 펄스를 안테나에 인가하기 위하여 피킹 스위치를 설계, 제작하여 그림 1과 같이 블룸라인 PFL 출력 단에 연결하였다. 피킹 스위치 (출력 임피던스=50 Ω)와 TEM 혼 안테나 (입력 임피던스=100 Ω)의 임피던스 정합을 위하여 발룬(Balun)이 설치되어 있다. 또한, 피킹 스위치의 동작특성을 조사하기 위하여 전압측정 센서가 그림 1의 P점에 부착되어 있다.

그림 1 UWB EMP 발생기의 개념설계도

Fig. 1 Conceptual design of the UWB EMP generator

2.2 피킹 스위치 설계 및 특성

피킹 스위치는 매우 빠른 (수 백 ps 정도) 상승시간의 펄스를 얻기 위하여 특별히 설계된 고전압 스파크 갭 스위치이다. 피킹 스위치는 일반적으로 자가 방전으로 동작되며 동작기체의 종류와 압력, 갭 간격에 의하여 상승시간이 정해진다. 특히 내부 인덕턴스를 최소화하기 위하여 갭 간격은 가능한 작게 만들어야 한다. 이와 더불어 매우 높은 전계(~MV/cm)가 전극 사이에 형성되어야만 원하는 상승시간을 얻을 수 있다. 피킹 스위치는 일종의 스파크 갭 스위치이므로 두 전극 사이에서 절연 파괴가 진행되는 그림 2와 같은 스파크 갭 스위치의 방전 채널 모델로 표현될 수 있다[8].

그림 2 스파크 갭 스위치의 방전 채널 모델

Fig. 2 Discharge channel model for a spark gap switch

두 전극 사이의 인덕턴스는 동축 전송선로 등가회로를 적용하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$L_s = \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \quad (1)$$

여기서 d 는 갭 간격이고 r_o 와 r_i 는 각각 동축 전송선로의 외부 도체의 내부 반경과 내부 도체 반경이다. 또한 동축 전송선로의 특성 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \quad (2)$$

여기서 ϵ_r 은 외부와 내부 도체 사이의 유전체의 비유전율이다. 식(1)과 (2)에 기초하여 본 논문에서는 두 개의 피킹 스위치를 제작하고 그 특성을 조사하였다. 아래에 두 피킹 스위치에 대하여 자세히 기술된다.

2.2.1 쐐기형 피킹 스위치

(a)

(b)

그림 3 쐐기형 피킹 스위치 (a) 입체도 (b) 단면도

Fig. 3 Wedge type peaking switch (a) 3D drawing (b) cross-sectional drawing

그림 1에서 피킹 스위치는 블룸라인 PFL 출력 플랜지의 중심에 부착된 입력 전극, 발룬 입력 플랜지의 중심에 부착된 출력 전극, 그리고 두 전극을 감싸는 원통형 도체로 구성되며 내부에 고압의 절연 기체가 채워진다. 그림 3은 실험 초기 단계에서 이용한 쐐기형 피킹 스위치를 나타낸다. 다음 두 가지 구조에 설계의 주안점을 두었다. 첫 번째는 인덕턴스를 줄이기 위하여 식(1)에서 두 전극을 감싸는 원통형 도체의 내부 반경을 가능한 작게 만들어야 함을 알 수 있다. 두 번째는 블룸라인 PFL과 스위치의 임피던스를 정합하는 구조이다. 블룸라인 PFL의 특성 임피던스는 50 Ω이므로 피킹 스위치의 특성 임피던스도 전 영역에서 50 Ω이 되어야 한다. 그렇지 않으면 반사파에 의하여 피킹 스위치의 출력은 왜곡될 수 있다. 식(2)에 $Z_0 = 50$ Ω을 대입하면 $r_o/r_i \approx 2.3$ 이다. ($\epsilon_r \approx 1$ 로 가정) 여기서 피킹 스위치 설계에 대한 구조적인 제한 조건을 살펴볼 필요가 있다. 즉, 원통형 도체의 양 끝은 블룸라인 PFL 출력 플랜지와 발룬 입력 플랜지에 체결되어야 하므로 원통형 도체의 양 끝에서 내부 반경을 줄이는데 한계가 있다. 또한 시스템 전체의 기계적 안정성 때문에 원통형 도체의 길이를 길게 하기도 어렵다. 위의 점

들을 고려하여 피킹 스위치의 전 영역에서 r_o/r_i 의 비율이 약 2.3 정도로 유지되면서 그림 3과 같이 원통형 도체의 내부 반경이 감소하는 쐐기 형상으로 제작하였다.

전자기 시뮬레이션 소프트웨어(CST Microwave Studio)를 이용한 시뮬레이션에서 얻은 쐐기형 피킹 스위치의 전형적인 출력은 그림 4에 도시되어 있다. 출력 펄스는 처음에는 피킹 작용을 하면서 급격하게 상승하지만 최대 전압의 약 50 % 지점에서 변곡점이 생기면서 펄스의 상승률이 급격하게 감소하는 현상을 보인다.

그림 4 쐐기형 피킹 스위치의 시뮬레이션 출력 파형
Fig. 4 Simulated output waveform of the wedge type peaking switch

2.2.2 임피던스 정합 피킹 스위치

참고문헌[9]에 따르면 동축 전송선로에서 선로의 형상이 서서히 변화하는 경우 r_o/r_i 의 비율이 일정하게 유지되면 특성 임피던스에는 변화가 없다. 그러나 선로의 형상이 급격하게 변화하면 무시할 수 없는 병렬 커패시턴스가 존재하여 그 결과 정합되지 않은 임피던스의 전송선로를 진행하는 펄스의 파형은 왜곡될 수 있다. 그러므로 그림 4에 나타난 펄스 파형이 왜곡되는 현상은 쐐기형 피킹 스위치에서 급격하게 변하는 전극과 원통형 도체의 형상과 관련된 것으로 해석될 수 있다. 그러나 왜곡 현상을 일으키는 형상과 관련된 r_o/r_i 의 비율에 대한 임계 변화율에 대한 정량적인 값은 알려져 있지 않다.

그림 4의 문제점을 개선하기 위하여 제작된 피킹 스위치가 그림 5에 도시되어 있다. 여기서 구조적 제한 조건은 언제나 유효하기 때문에 원통형 도체의 내부 반경이 그림 3과 같이 급격하게 변하는 것을 구조적으로 개선하기 어렵다는 점에 주의하여야 한다. 여러 가지 형상에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 출력 전극과 안테나 사이에서 일어나는 급격한 임피던스 변화가 출력 파형을 왜곡시키는 주요 인자임이 밝혀졌다. 또한 그림 5와 같이 출력 전극 주위에 쐐기 모양의 유전체(MC 901 Nylon, $\epsilon_r=3.7$)가 삽입되어 있는 구조에서 임피던스 변화가 확연히 감소한다는 것을 알 수 있었다. 이것은 식(2)에서 보듯이 임피던스는 r_o/r_i 뿐만 아니라 ϵ_r 의 함수이기 때문이다.

그림 5 임피던스 정합 피킹스위치 (a) 입체도 (b) 단면도
Fig. 5 Impedance matching peaking switch (a) 3D drawing (b) cross-sectional drawing

그림 6 입력 전극에 상승시간 300 ps의 신호가 인가될 때 출력 신호 파형

Fig. 6 Output signal waveform when a signal of 300 ps rise time is applied to the input electrode

파형의 왜곡을 최소화할 수 있는 최적의 전극 구조를 구하기 위하여 그림 5(b)에서 정의된 각도 α 와 각도 β 를 변화시키면서 출력 펄스의 상승시간을 조사하였다. 그림 6은 입력 전극에 상승시간 300 ps의 신호가 인가될 때 출력 신호에 대한 시뮬레이션의 일례를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 출력 신호가 상승하는 동안 어떤 왜곡도 관찰되지 않는다. 또한 모든 경우에서 상승시간은 300 ps보다 작게 나

타하는데 이것은 피킹 스위치가 잘 동작한다는 것을 의미한다. 시뮬레이션을 통해 $\alpha=63^\circ$, $\beta=75^\circ$ 의 구조에서 피킹 스위치의 효과가 최고가 된다는 것을 알 수 있고 이 때 출력 신호의 상승시간은 274 ps이다. 이 결과를 토대로 임피던스 정합 피킹 스위치는 $\alpha=63^\circ$, $\beta=75^\circ$ 인 구조로 제작되었다.

3. 실험 결과

임피던스 정합 피킹 스위치는 자가 방전으로 동작되기 때문에 절연파괴 전압 특성을 반드시 알아야 한다. 일반적으로 두 전극 사이의 절연파괴 전압은 파센(Paschen) 법칙에 의하여 갭 간격(d)과 절연기체 압력(p)의 함수로 표현된다. 그림 5에서 d는 3 mm 혹은 5 mm로 선택될 수 있으며 SF₆(25%)와 N₂(75%)의 혼합기체가 내부에 채워져 있다. 두 갭 간격에 대하여 기체 압력을 증가시키면서 절연파괴 전압 특성을 조사한 결과가 그림 7에 도시되어 있다. 실험 결과에 대한 신뢰성을 보장하기 위하여 동일한 조건에 실험을 5회 수행하여 얻은 데이터가 그림 7에 제시되어 있다. 여기서 압력과 갭 간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압이 증가하므로 피킹 스위치의 절연파괴 전압 특성은 파센 최소 전압의 오른쪽 영역에 나타나는 전형적인 특성임을 알 수 있다. 또한, 압력에 대한 절연파괴 전압의 증가율과 데이터의 재현성을 살펴보면 두 갭 간격의 데이터 사이에서 특별한 차이를 관찰할 수가 없다. 한편, d=5 mm 보다 d=3 mm인 경우, 내부 인덕턴스가 작다는 것은 분명하다. 그러므로 300 kV의 펄스를 발생시키기 위하여 d=3 mm, p=1.8 MPa를 피킹 스위치 동작의 초기 조건으로 정하였다.

그림 7 임피던스 정합 피킹 스위치의 절연파괴 전압 특성
Fig. 7 Breakdown voltage characteristics of the impedance matching peaking switch

피킹 스위치가 펄스 상승시간을 단축시키는 효과를 알아보기 위하여 피킹 스위치 전후의 펄스 파형을 비교하였다. 그림 8은 피킹 스위치 전에서 측정한 블룸라인 PFL의 출력 펄스의 전형적인 파형들을 보인다. 그림에 나타난 바와 같

이, 블룸라인 PFL의 충전 전압이 증가함에 따라 펄스의 최대치는 커지지만 펄스의 모양과 상승시간은 거의 동일하다. 즉, 충전 전압과 무관하게 피킹 스위치의 입력 펄스의 상승시간은 약 5 ns이고 펄스폭은 10 ns이다. 여기서 상승시간은 최대치의 10 %에서 90 %로 상승하는데 걸리는 시간으로 정의된다.

그림 8 전형적인 블룸라인 PFL의 출력 펄스 파형
Fig. 8 Typical waveform of the output pulse from Blumlein PFL

피킹 스위치의 성능을 조사하기 위하여 약 300 kV로 충전된 블룸라인 PFL의 출력 펄스를 피킹 스위치의 입력 전극에 인가한 후 출력 전극에 연결된 50 Ω의 순수 저항에서 피킹 스위치의 출력 펄스 파형을 측정하였으며 그 결과가 그림 9에 도시되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 썩기형 피킹 스위치의 경우(적색 점선), 대부분의 구간에서 파형은 왜곡되며 특히 그림 4의 시뮬레이션과 유사하게 상승 구간에서 생기는 변곡점 때문에 상승시간은 약 1.5 ns 정도로 길다. 앞에서 언급한 바와 같이 이와 같은 파형 왜곡의 원인은 급격하게 변하는 원통형 도체의 내부 구조로 인한 임피던스 부정합이다. 한편, 임피던스 매칭 피킹 스위치의 경우(흑색 실선), 상승 구간에서 파형은 전혀 왜곡되지 않으며(파형의 상승시간은 약 500 ps) 나머지 구간에서도 썩기형 피킹 스위치보다 파형은 양호하게 나타난다. 이것은 당연히 출력 전극에 삽입된 유전체의 효과로 인한 임피던스 정합 때문이다. 결과적으로, 임피던스 매칭 피킹 스위치는 그림 8과 비교하면 상승시간을 약 1/10로 단축시킬 수 있는 성능을 나타낸다.

앞에서 언급한 바와 같이, 피킹 스위치의 출력 펄스가 UWB 신호가 되기 위해서는 펄스의 주파수 대역에서 고주파 성분이 많아야 한다. 상승시간의 단축이 주파수 스펙트럼에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 그림 8의 파형(충전전압=225 kV)과 그림 9의 파형에 대한 푸리에 스펙트럼을 계산하고 그 결과를 그림 10에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 피킹 스위치 전 펄스의 경우(그림 8), 250 MHz 이상의 고주파 성분은 급격하게 감소한다. 그러나 피킹 스위치 후 펄스의 경우(그림 9), 모든 고주파 성분은 그림 8의 경우보다 최대 20 dB 이상 크게 나타난다.

그림 9 임피던스 정합(흑색 실선)과 쐐기형(적색 점선) 피킹 스위치의 출력 펄스 파형

Fig. 9 Waveforms of the output pulses from impedance matching(black solid line) and wedge type(red dotted line) peaking switches

그림 10 임피던스 매칭 피킹 스위치 입력펄스(흑색 실선)와 출력펄스(적색 점선)에 대한 푸리에 스펙트럼 비교

Fig. 10 Comparison of Fourier spectrum regarding input pulse(black solid line) and output pulse(red dotted line)

4. 결 론

UWB EMP를 방사하기 위한 고전압 펄스장치에서 안테나에 인가되는 펄스의 상승시간을 단축시키기 위하여 두 가지 형태의 피킹 스위치를 제작하고 시뮬레이션과 실험을 수행하여 동작 특성을 조사하였다. 쐐기형 피킹 스위치의 경우, 형상의 급격한 변화로 인하여 임피던스 부정합이 생기고 그 결과 상승 구간에서 파형에 왜곡이 발생하여 원하는 상승시간을 얻을 수가 없었다. 이 점을 개선하기 위하여 출력전극 주위에 쐐기 모양의 유전체를 삽입하여 임피던스를 정합시킬 수 있는 피킹 스위치를 제작하였다. 실험 결과, 펄스의 상승시간을 5 ns에서 500 ps로 단축시킬 수 있는 정도로

임피던스 정합 피킹 스위치의 성능은 양호하게 나타났다. 또한 블룸라인 PFL의 출력 펄스는 임피던스 정합 피킹 스위치를 통하여 최대 전압 300 kV, 상승시간 500 ps, 펄스 폭 5 ns의 펄스가 되었다.

참 고 문 헌

- [1] D. V. Giri, High Power Electromagnetic Radiators, London: Harvard University, 2004.
- [2] J. Liu, Y. Yin, B. Ge, X. Cheng, J. Feng, J. Zhang, and X. Wang, "A compact high power pulsed modulator based on spiral Blumlein line," Rev. Sci. Instrum. vol. 78, 103302-1-103302-5, 2007.
- [3] M. Camp, H. Gerth, H. Garbe, and H. Haase, "Predicting the Breakdown Behavior of Microcontrollers Under EMP/UWB Impact Using a Statistical Analysis," IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol. 46, pp. 368-379, 2004.
- [4] D. V. Giri and F. M. Tesche, "Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)," IEEE Trans. Electromagn. Compat. vol. 46, pp. 322-328, 2004.
- [5] Y.S. Jin, S.W.Lim, C.H. Cho, J.S. Kim, S.H. Lee, and Y. Roh, "High voltage ultrawide band pulse generator using Blumlein pulse forming line," Rev. Sci. Instrum. vol. 83, pp. 044704-1-044704-5, 2012.
- [6] A. D. Blumlein, "Improvements in or relating to apparatus for generating electrical impulses," GB Patent 589 127, 1947.
- [7] X.Wang, H. Luo, and Y. Hu, "Numerical Simulation of the Gas Discharge in a Gas Peaking Switch," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 35, pp. 702-708, 2007.
- [8] J. M. Lehr, C. E. Baum, W. D. Prather, and R. J. Torres, Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [9] G.A. Mesyats, Pulsed Power, New York: Springer, 2005.

저 자 소 개

노 영 수 (盧永秀)

1984년 서울대 전기공학과 졸업.
1986년 서울대 전기공학과 졸업(석사)
2001년 UCD 응용과학과 졸업(박사)
2003-현재 숭실대 전기공학과 부교수
Tel : (02) 820-0663
E-mail : yroh@ssu.ac.kr

진 윤 식 (陳潤植)

1986년 서울대 원자핵공학과 졸업
1990년 서울대 원자핵공학과 졸업(석사)
1999년 Nagasaki대 전자정보공학 (박사)
1990-현재 한국전기연구원 책임연구원
Tel : (055) 280-1458
E-mail : ysjin@keri.re.kr

조 주 현 (曹柱鉉)

1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업
1993년 한양대 전기공학과 졸업(석사)
2004년 長岡技科大 에너지환경(박사)
1996~현재 한국전기연구원 선임연구원
Tel : (055) 280-1420
E-mail : cho@keri.re.kr

임 수 원 (林秀原)

2009 부경대 전기공학과 졸업
2012 과학기술 연합대학원 졸업(석사)
2012-현재 한국전기연구원 연구원
Tel : (055) 280-2472
E-mail : swlim@keri.re.kr