

펄스파워 시스템용 고전압 펄스변압기의 EMTP 시뮬레이션

김민수*, 이형구, 주흥진, 고광철, 강형부
한양대 전기공학과

A EMTP Simulation of High-Voltage Pulse Transformer for Pulsed Power System

Min-Soo Kim*, Hyong-Gu Lee, Heung-Jin Ju, Kwang-Cheol Ko, Hyong-bu Kang
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - In pulsed-power techniques, Marx generator is generally used for the high-power device, but this generator has insulation and spatial problems. So we will suggest a pulse transformer that has a small size to generate the high voltage pulse instead of Marx generator. In this paper, Pulse duration is 4 (μ s) and the ratio of input and output voltage is 40(kV)/200(kV)(step-up ratio=5). The output voltage and the process of pulse compression for pulse circuit are simulated by EMTP (Electro-Magnetic Transient Program). The secondary voltage of pulse transformer is about 200(kV) and pulse width is 4(μ s). When the secondary winding of the pulse transformer is saturated, the pulse width is 1.25(μ s). We selected dummy load 50(Ω) for impedance matching. The pulse voltage of dummy load is 100(kV) and pulse width is 500(ns).

1. 서 론

최근 이용되는 펄스파워를 발생시키는 기술로는 두 가지를 들 수 있다. 펄스형성선로를 이용하는 PFN(Pulse Forming Network)과 자기압축을 이용하는 MPC(Magnetic Pulse Compression)이다. PFN은 전송선로에 에너지를 저장하고, 갭 스위치에 의한 방전을 통하여 펄스를 발생시키는 기술이다[1]. MPC는 자기스위치(Magnetic Switch)를 이용하여 펄스를 단계적으로 압축하는 기술이다. 이러한 펄스발생장치에서 일반적으로 고전압을 발생시키기 위해서 Marx발생기를 많이 이용한다. Marx발생기는 다수의 콘덴서를 병렬로 충전한 후, 순간적으로 직렬로 접속시킴으로써 고전압을 얻는 것인데, Marx발생기를 대기중에 설치하면 절연을 확보하기 위해서는 장치가 커질 뿐만 아니라, 콘덴서가 다단 직렬회로가 되므로 스위치 및 콘덴서의 인덕턴스 성분은 방전 파형에 많은 영향을 주고, 충전시간이 길어서 반복에 적합하지 않다. 따라서 다음과 같은 이유에 의해 펄스변압기를 사용하는 것이 필요하다.

- (1) 다수의 콘덴서를 필요로 하지 않으므로 장치가 단순해지며, 소형화 할 수 있고, 경제적이다.
- (2) 하나의 스위치를 사용하고 또한 낮은 전압에서 운전되므로, 적합한 스위치의 선정이 용이하고 고 반복 운전이 가능하다.

초기에너지 축적은 용량이 작은 하나의 콘덴서를 이용하고 펄스변압기에 의해 원하는 높은 전압을 발생시키면 된다.

펄스변압기는 일반적으로 정상상태에서 사용되는 변압기와는 달리 과도 상태에서의 응답이 중요하다. 그래서 펄스변압기의 펄스회로를 해석하기 위해서는 과도현상 해석프로그램인 EMTP를 이용할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 펄스변압기를 포함하는

MPC회로의 출력전압과 출력전류 및 펄스가 압축되는 과정을 알아본다.

2. 본 론

2.1 EMTP를 이용한 Simulation

EMTP(ElectroMagnetic Transient Program)는 Bergeron법을 이용해 만든 모든 전력계통 구성요소를 포함한 전력계통용 과도현상 해석 프로그램이다. EMTP의 초기 목적은 전력계통의 서지현상만을 분석하기 위한 것이었으나, 이 후 동기발전기, 사이리스터, 제어계, 회전기기의 모델이 추가되었으며 터빈발전기의 SSR(Sub Synchronous Resonance)모델과 교류-직류 변환기 및 고조파 해석까지 할 수 있는 기능이 보강되어 범용성이 풍부하다.

EMTP를 이용한 과도현상의 해석은 물리적 실체를 통한 과도현상의 직접적인 체험이 아니고, 수학적 형식과 수식적 모델에 의한 간접적인 근사 추정임에도 불구하고 그 모의 결과의 정밀함과 신뢰도가 충분히 입증되었으므로, EMTP 프로그램이 가지고 있는 수학적 방법론을 이해한다면 EMTP를 효과적으로 이용할 수 있다.

2.1.1 EMTP의 이용 범위

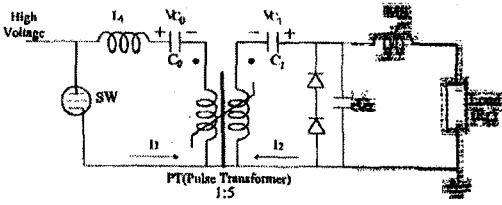
EMTP로 분석 가능한 각종 요소의 종류에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 집중저항, 인덕턴스, 커패시턴스 소자 : 여기서는 단상요소와 다상 RL 결합요소, RLC 행렬로 된 π 회로, 각 소자의 모델링과 송전선 및 변압기의 모델링이 가능하다.
- 2) 진행파 모델 : π 회로보다 정밀한 가공선과 케이블의 표현이 가능하다.
- 3) 비선형 모델 : 피뢰기(비선형저항)와 철심의 포화(비선형 리액터, 히스테리시스)모델용 시변저항소자 등이 있다.
- 4) 스위치 : 차단기 점접 모의와 갭의 방전에 이용되는 이상스위치(시간, 전압제어, 통계분석용), 다이오드, 사이리스터
- 5) 이상전압전류원 : 정현파(여현파), 직류, 계단함수, 지수함수파, 직선상승파, 사용자 정의 전원 등이 있다.
- 6) 3상 동기기
- 7) 일반 회전기 : 유도기, 직류기, 3상이 아닌 동기기용.
- 8) TACS(Transient Analysis of Control System) : 제어계 시뮬레이션.

2.2 MPC용 펄스변압기의 원리와 펄스회로

MPC(Magnetic Pulse Compressor)용으로 이용되는 펄스변압기는 일반적인 변압기와는 달리 두 가지 기능을 가지고 있다. 일반적인 변압기처럼 승압용으로 이용될 뿐만 아니라, 자기스위치(Magnetic switching)기능을 가

진다. 그림 1은 본 논문의 펄스변압기가 사용될 펄스압축회로를 보여준다. 초기에 커패시터 C_0 는 고전압 dc 전원에 의해 V_{C0} 으로 충전된다. 펄스변압기는 포화되기 전



까지는 일반적인 변압기로 동작하며, $C_0 \rightarrow L_1 \rightarrow SW \rightarrow PT \rightarrow Diode \rightarrow C_1$ 로 흐르는 전류에 의해 C_0 의 에너지는 C_1 로
 그림 1. 펄스변압기를 이용한 펄스압축회로
 Fig 1. Magnetic pulse compression circuit using pulse transformer

으로 전달된다.

C_1 이 완전히 충전되었을 때, V_{C1} 은 최대가 되고 펄스변압기는 포화된다. 포화된 펄스변압기 2차측은 자기스위치로써 이용되어 "on"상태가 되고, C_1 에서 C_2 로 에너지가 전달되기 시작한다. 이때 자기스위치 MS는 "off"상태이다. 펄스변압기의 1차측의 인덕턴스 L_1 에 비해 $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow PT$ 루프의 인덕턴스 L_{2sat} (펄스변압기 2차측이 포화되었을 때 인덕턴스)를 감소시킴으로써 I_2 (PT의 2차측의 전류)는 압축된다. C_2 가 완전히 충전되고, 자기스위치 MS가 포화("on")상태로 되어, $C_2 \rightarrow MS \rightarrow R_L$ 의 경로를 통해 부하에는 짧은 폭의 펄스가 전달된다.

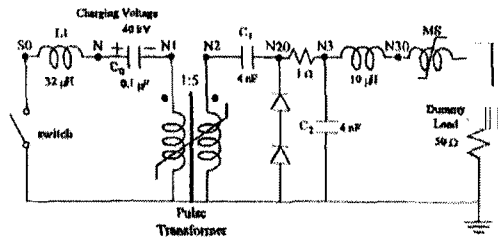


그림 2. 시뮬레이션을 위한 등가회로
 Fig 2. Equivalent circuit for simulation

2.3 시뮬레이션을 위한 등가회로와 출력파형

펄스변압기를 포함한 자기압축회로를 시뮬레이션 하기 위한 등가회로는 그림 2에 있다. 그림 2에서 커패시터 C_0 의 초기 충전 전압은 40(kV)이고, MS의 인덕턴스 성분은 약 10(μ H)로 하였다. 부하는 단지 저항성 부하만 존재한다고 가정하고, 펄스발생기와 모의부하의 임피던스 조화를 고려하여 R_L 은 50(Ω)으로 하였다.

그림 3은 EMTP를 이용하여 시뮬레이션 한 펄스압축회로의 전류파형을 보여준다. 펄스변압기의 1차측 전류 I_1 의 펄스폭은 4(μ s)이고, 펄스변압기가 자기스위치로 작동할 때 I_2 의 펄스폭은 1.25(μ s)이며, MS를 지나는 전류의 펄스폭은 500(ns)이다. 그림 3을 통하여 펄스압축회로에서 펄스파형이 압축되는 것을 알 수 있다.

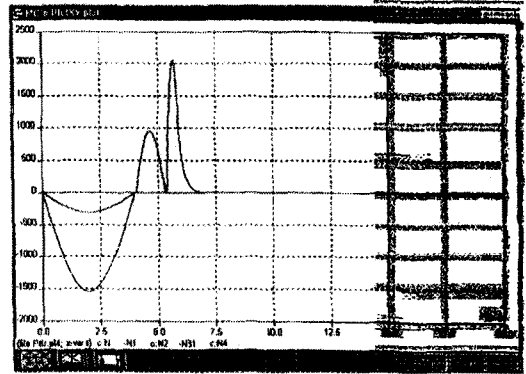


그림 3. 펄스변압기의 입·출력 전압파형
 Fig 3. Compression of current wave in pulse ci

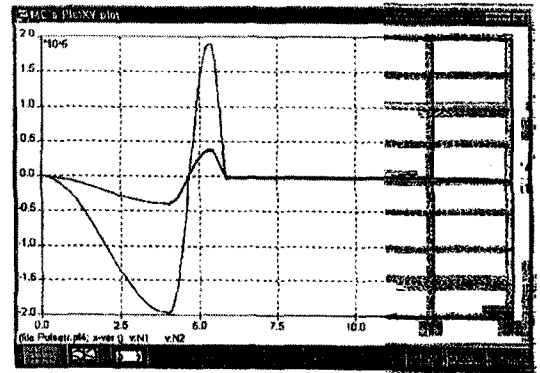


그림 4. 펄스변압기의 입·출력 전압파형
 Fig 4. Input and output voltage of pulse transf

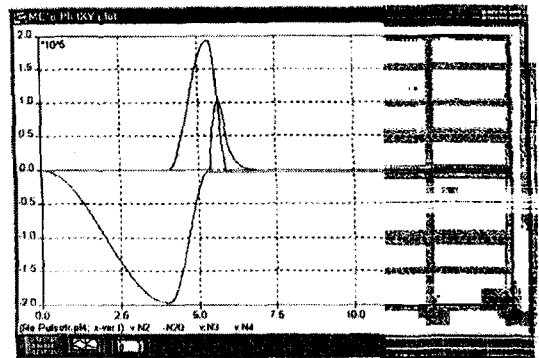


그림 5. 펄스발생기의 출력 전압 파형
 Fig 5. Output voltage of pulse generator

그림 4는 펄스변압기의 입력전압과 출력전압 파형을 보여준다. 40[kV] 입력전압에 펄스변압기의 출력전압은 196[kV]이고, 펄스폭은 4[μ s]라는 것을 알 수 있다.

그림 5를 통해 펄스회로에서 전압의 펄스폭이 압축되는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 임피던스 조화를 고려한 부하에서는 100[kV], 500[ns]의 펄스를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 펄스파워전원용 고전압 펄스변압기를 설계하고 펄스변압기를 이용한 펄스발생기의 출력파형을 EMTP를 이용하여 모의하였다. 펄스변압기의 펄스폭은 4[μ s], 전압비는 40[kV]/200[kV](ratio 1:5)가 되도록 설계하였다. 펄스변압기를 이용한 자기압축회로 출력의 임피던스는 임피던스 조화를 고려하여 50[Ω]으로 하였다. 시뮬레이션하기 위한 등가회로를 구성하고, 펄스회로의 각 질점에서 출력파형을 시뮬레이션 하였다. 펄스변압기의 2차측의 출력전압은 196[kV]이고, 출력전류는 309[A]이며, 시뮬레이션을 통해 펄스가 4[μ s], 1.25[μ s], 500[ns]로 압축되는 것을 확인하였다. 임피던스 조화를 고려한 모의부하에서의 최대출력전압과 최대출력전류는 100[kV], 2[kA]라는 것을 알 수 있으며, 이 때 펄스변압기에서의 펄스폭은 4[μ s], 모의부하에서 펄스폭은 500[ns]를 얻었다.

(참 고 문 헌)

- [1] W.James Sarjeant and R.E. Dollinger, "High-Power Electronics", TAB BOOKS Inc., 1989
- [2] G. J. Rohwein, "A Three Megavolt Transformer For PFL pulse charging", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-26, NO. 3, June 1979
- [3] John Christopher Martin, "Nanosecond pulse Techniques", Proceedings of the IEEE, Vol. 80, NO. 6, June 1992
- [4] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, DAS-88, 388, (1969)
- [5] K. Kurihara, S. Kobayashi, et al., "Magnetic Pulse Compressor Using saturable Transformer to Excite Excimer Lasers", Rev. Sci. Instrum. 63(4), April 1992
- [6] Stanley Humphries Jr., "Principles of Charged Particle Acceleration", John Wiley & Sons, Inc., (1986)
- [7] L. Civitano "Industrial Application of Pulsed Corona Processing to Flue Gas", Nato ASI Series
- [8] D. Birx, et al., "The Application of Magnetic Switches As Pulse Sources for Induction LINACS", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 4, August 1983