

사이라트론 구동용 제어회로 설계에 관한 연구

김한기*, 정태원*, 차병헌**
 충남대학교 전기공학과*, 한국원자력연구소**

Analysis and Design of The Thyatron Controller

Han-Gee Kim*, Tae-Won Jeong*, Beong-Heon Cha**

Abstract - There have been significant advances in thyatron performance in recent years. these advanced waveforms have increased the complexity and cost of drive circuits.

Thyatrions can reliably switch anode voltages up to 40kV and conduct peak currents up to 10kA or more. So stable thyatron drivers are essential for reliable high voltage pulse modulators. In order to operate thyatron well, thyatron driver need high repetition rate, fast rising time and low jitter.

In this paper, used power MOSFET/transformer combinations. Designed thyatron driver is satisfied requirements and experimental results are presented to confirm.

1. 서 론

진공관의 일종인 사이라트론은 기체봉입관으로써 수십 kV, 수 kA, 수십 kHz이상의 반복율로 스위칭이 가능하므로 현재에도 대전력, 고반복율의 펄스 스위치로서 가장 널리 사용되고 있다[3,4]. 사이라트론은 가격이 비교적 고가이며 사용법이 복잡하고 음극의 열화와 봉입된 수소 가스의 소모 때문에 수명이 비교적 짧은 단점(약 10^9 shot)이 있으나 높은 내전압, 큰 피크전류, 높은 전류 상승률, 높은 펄스 반복율, 적은 jitter, 등 많은 장점을 가지고 있어 현재 많은 분야에서 고출력 장치의 스위칭소자로 사용되고 있다. 실험에 사용된 사이라트론은 5극관으로서 양극(Anode)과 음극(Cathode) 그리고 3개의 그리드(Grid)가 있다. 음극에 가까운 그리드(Grid)로부터 제1, 제2, 제3 그리드로 구성된다. 3개의 그리드중 트리거 펄스가 인가되는 그리드는 제 2 그리드이다. 제 3 그리드는 저항을 통하여 접지되고 제 1 그리드는 효과적인 턴-온을 하기 위하여 약 150-200V의 직류전압이 항상 인가되어 저밀도의 플라즈마 상태를 유지하도록 한다. 그림 1에 사이라트론의 트리거 발생장치의 구성도를 나타내었다.

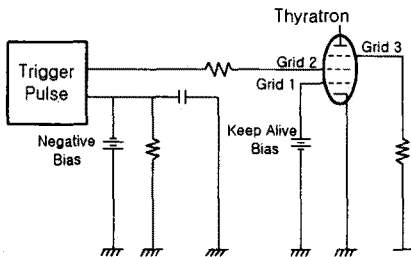


그림 1 사이라트론 트리거펄스 발생장치

사이라트론에서의 일반적인 설계조건을 표 1에 나타내

었다. 이러한 설계조건을 만족시키는 스위칭을 위해서는 빠른 펄스 상승 특성을 가지는 트리거 펄스 드라이버가 필요하다[5-7, 12].

표 1 사이라트론 제어그리드의 조건

제어 그리드 (Grid 2)	사양	최소값	최대값	단위
	무부하시 드라이버 펄스 전압		600	2000
펄스 폭		2	-	us
펄스 상승률		4	-	kV/μs
역방향 전압		-	450	V
부하시 바이어스 전압		-50	-200	V

펄스 드라이버 종류에도 여러 가지가 있으나[6]. 본 실험에서는 빠른 주파수 특성과 높은 전류에서도 스위칭할 수 있는 power MosFET 사용하여 펄스 드라이버를 제작하였다.

본 논문에서는 이러한 고반복율 트리거 펄스 스위치를 효과적으로 제어할 수 있도록 제어회로를 설계 및 제작하였으며 사이라트론의 일반적인 요구사항을 만족한다는 것을 실험을 통해서 확인했다. 본문에서는 사이라트론의 일반적인 구조와 특성, 그리고 사이라트론을 구동하기 위한 전체적인 시스템 설계를 하였다. 그리고 제작한 사이라트론 구동용 드라이버의 실험결과와 고찰을 다루었고. 마지막으로 결론을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 사이라트론의 구조와 원리

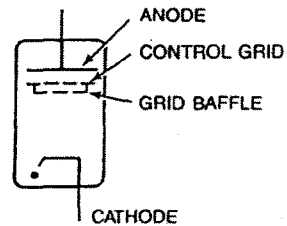


그림 2 일반적인 사이라트론의 구조

그림 2에 사이라트론의 일반적인 구조를 나타내었으며 사이라트론의 양극(Anode)과 그리드 사이의 거리는 Pd 곱이 0.1 torr-cm 이하가 되는 즉 파선 곡선에서 왼쪽편(그림 3에서)으로 하여 절연 파괴전압이 높도록 되어있다. 그리드와 캐소드(음극) 사이의 거리는 절연 파괴전압이 가장 낮은 Paschen minimum (약 300V, Pd = 1 torr-cm)이 되도록 하여 그리드에 의하여 사이라트론이 쉽게 트리거 되도록 한다.

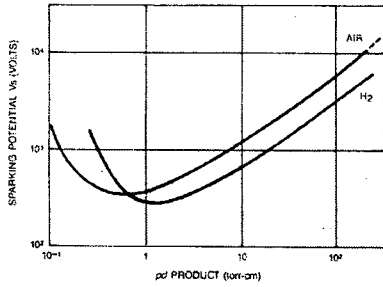


그림 3 과선 곡선

사이라트론이 턴-온에서 턴-오프 되는 과정은 다음과 같다. 사이라트론의 그리드에 양(+)의 트리거 펄스가 인가되면 그리드와 캐소드 사이의 영역에서 플라즈마가 형성되며, 이 플라즈마는 재빨리 그리드를 통과하여 애노드와 그리드 사이의 영역으로 이동하여 애노드와 그리드간의 고전압 방전을 일으킨다. 고전압 방전에 의하여 애노드-그리드 영역에서 생성된 고밀도 플라즈마는 다시 그리드-캐소드 영역으로 확산해 들어가며, 이 과정에서 내부 기체(수소)의 이온화가 더 한층 촉진되어 애노드-캐소드 영역은 턴-온 상태가 된다.

2.2 시스템 제어회로 설계

사이라트론을 고반복율로 안정되게 스위칭 시키기 위해서 빠른 펄스 상승 특성을 가지는 전체 시스템 설계도를 보면 그림 4와 같다.

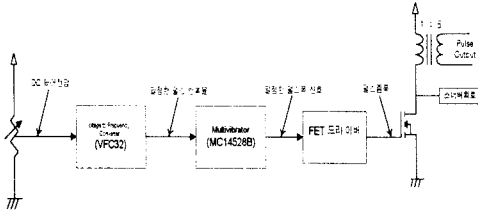


그림 4. 사이라트론 펄스 제어회로

2.2.1 펄스 발진

발진회로는 전압-주파수 변환 IC VFC32를 사용하여 발진 주파수를 가변할 수 있도록 제작하였다. VFC32의 주요 특징은 출력 펄스가 TTL이나 CMOS IC에 모두 적용 가능하고 입력 제어전압에 비례하는 출력 주파수의 선형성이 0.05% 이내로 정밀성을 가진다는 점이다.

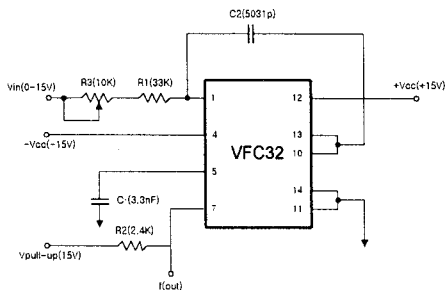


그림 5 펄스 발진회로

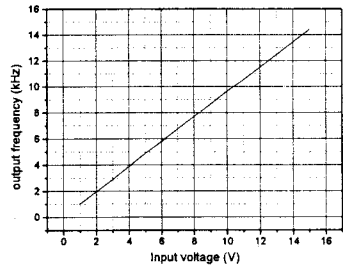


그림 6. 펄스 발진회로의 V-F 특성

2.2.2 펄스폭 설정회로

펄스 발진회로에서 출력되는 펄스를 펄스 반복율에 관계없이 1μs의 일정한 펄스폭을 가지도록 하기 위하여 CMOS IC MC14528B를 사용하였다.

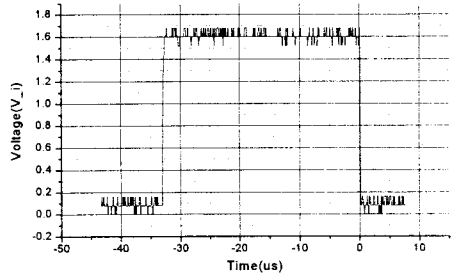


그림 7. 펄스폭 설정회로의 입력파형

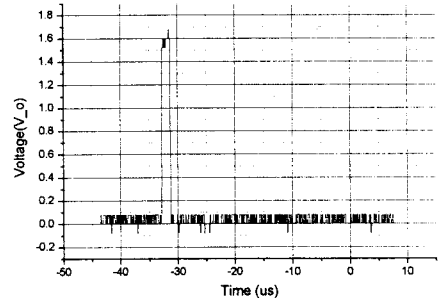


그림 8. 펄스폭 설정회로의 출력파형

2.2.3 펄스 증폭회로

펄스폭 설정회로에서 출력되는 펄스는 전력 MOSFET를 효과적으로 스위칭 할 수 없으므로 FET 전용 driver TC4422를 사용하여 증폭하였고 이 증폭된 신호도 지연 시간이 길기 때문에 신속히 턴-오프 시키기 위해서 P-N 접합 쌍으로 구성된 회로를 추가하였다. 여기에 사용된 TC4422는 CMOS IC로서 MOSFET 나 IGBT등과 같이 용량성 부하로 작용하는 전력 반도체 스위치를 효과적으로 스위칭하기 위하여 개발된 소자로서 상승 및 하강시간이 47,000pF 부하인 경우에도 180ns 미만이다. 이는 본 논문에서 사용하는 전력 FET 스위치의 입력 정전용량이 18,000pF 인점을 감안하면 적합한 FET 드라이버임

을 알 수 있다. 그림 9에 펄스 증폭회로를 나타내었다.

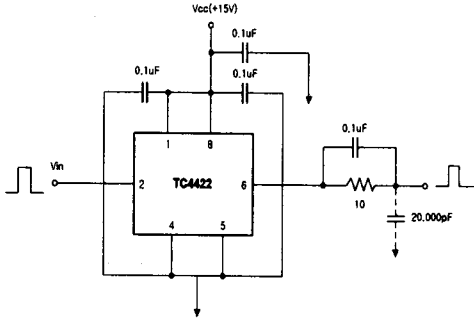


그림 9. 펄스 증폭회로

실험에 사용한 MOSFET는 80A/500V의 특성을 가지는 Gentron corporation사의 EUM099-M220을 사용했다. 그림 10에 MOSFET의 출력파형을 나타내었다.

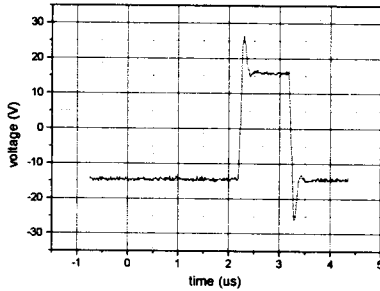


그림 10. MOSFET의 출력파형

그림 10에서 알 수 있듯이 전력 스위칭 소자인 FET가 전류를 급속히 차단할 때 펄스 변압기의 누설 인덕턴스와 선로 분포 인덕턴스에 저장된 에너지에 의해 FET의 드레인에는 큰 전압이 발생한다. 이 유도 역전압은 스위칭 소자에 무리를 주며 때로는 소자의 최대 내전압을 넘어서 소자를 파괴시키는 수도 있다. 따라서 고속 대전류 스위칭 소자에서 스너버 회로는 필수적이며 일반적으로 저항과 캐패시터 그리고 다이오드를 조합하여 유도 역전압을 감소시킨다.

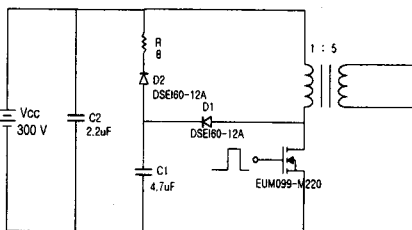


그림 11 설계된 스너버 회로

2.2.4 펄스 변압기 설계

일반적으로 펄스 변압기를 설계할 때 고려해야할 사항으로는 펄스전압, 펄스 전류, 1차와 2차 사이의 전압비, 펄스폭, 펄스 반복율, 펄스 상승률 등이 있다. 펄스 변압기를 설계하기 위해서 우선 적합한 코어를 선택하는 것이 중요하다. 변압기의 누설 인덕턴스는 코일의 분포용량과 함께 펄스 상승률을 저하시키는 요인이 된다[10].

일단 코어가 정해지면 코어의 정격을 감안하여 코일 권선수를 계산한다. 본 논문에서는 여러 사항을 고려해 볼 때 고주파 특성이 우수한 Ni-Zn계열 페라이트 코어[11]와 코일은 테프론 전선을 사용하였다. 펄스 변압기의 설계과정은 Faraday의 법칙, 자장의 세기(H), 그리고 ΔB 의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$V_p \times \tau = \Delta B \times N \times A \quad (1)$$

여기서 V_p = 1차전압, τ = 펄스폭, ΔB = B-H곡선에서의 평균자속밀도, N = 1차 코일의 권수, A = 코어의 단면적이다. 그리고 평균자로 l 은

$$\frac{N \times I_m \times \mu}{\Delta B} \quad (2)$$

여기서 I_m 는 코어의 평균 자화전류($0.1 \times I_p$), l =평균자로의 길이, μ 는 코어의 투자율이다. (1)식과 (2)식으로부터 코어의 체적을 구할수 있다. 코어의 체적은

$$\text{코어의 체적}(A \times L) = \frac{V_p \times \tau \times I_m \times \mu}{(\Delta B)^2} \quad (3)$$

이 된다. (3)식에 의해 코어의 체적을 계산한 결과 코어한 개면 충분하다. 따라서 펄스 변압기의 설계사양을 표 2에 나타내었다.

표 2 펄스 변압기 설계 파라미터

입력전압	300 [V]
입력전류	25 [A]
출력전압	1500 [V]
출력전류	5 [A]
입출력 전압비	1 : 5
펄스 폭	1 [μs]
코어 Type	Toroidal Type
코어재질	페라이트(K_{6A})
바깥지름	68mm
안지름	43mm
코어 두께	13mm
평균자로	173mm
코어단면적	156 [mm ²]
자속변화량	0.08 [tesla]
1차측 권선수	24 [turn]
2차측 권선수	120 [turn]

3. 실험 및 고찰

펄스 변압기의 2차측과 사이라트론의 제어그리드사이에는 직류 네거티브 바이어스 전원을 직류적으로 차단시키기 위하여 네거티브 바이어스 차단용 캐패시터가 삽입된다. 트리거 펄스가 (+), (-)대칭이 아니므로 이 차단용 캐패시터에 전하가 축적되어 캐패시터의 전위가 적정 네거티브 바이어스전압보다 수배 이상 상승할 수가 있다. 이를 방지하기 위하여 차단용 캐패시터 양단에 잔류 전하 방전용 저항을 부착하였다.

사이라트론이 턴-온되는 수 10ns의 과도상태 동안에는 제어그리드(제2그리드)와 고전압 전위인 양극 사이 구간이 제어그리드와 0전위인 음극전위 사이보다 먼저

도통됨으로써 사이라트론 양극(Anode)의 고전압이 트리거 펄스 발생장치에 인가되어 장치가 파손될 가능성이 있다. 이 문제는 펄스 변압기와 사이라트론 제어그리드 사이에 직렬로 삽입된 권선형 저항의 인덕턴스로 차단할 수 있다. 반면에 이 인덕턴스는 트리거 펄스의 빠른 상승을 방해하므로 펄스의 사용 용도에 따라서는 적절한 값으로 타협을 하거나 인덕터를 제거하고 다른 보호대책을 강구해야 할 가능성도 예상된다.

300 Ω의 무유도 저항을 부하로 했을때의 전압과 전류 파형은 그림 12, 그림 13와 같다. 이들 그림에서 침두 전압은 1.3kV이고 전류는 4.1A, 펄스폭은 1 μs이다.

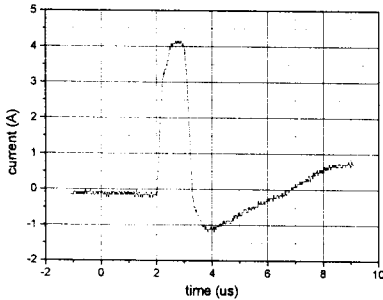


그림 12. 펄스변압기의 출력전류

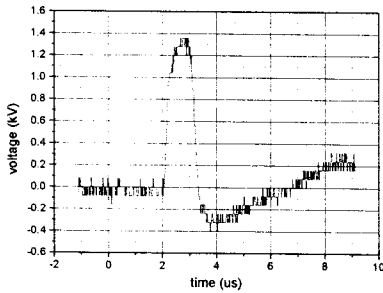


그림 13. 펄스변압기의 출력전압

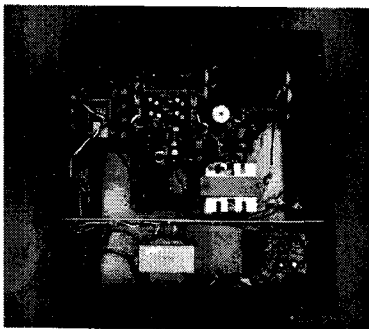


사진 1 제작한 사이라트론 제어회로

4. 결 론

최근까지 사이라트론 드라이버의 설계가 많이 이루어지고 있다. 사이라트론의 종류도 여러 종류가 있어 이를 구동하기 위한 드라이버의 설계는 여전히 개발되고 있

다.

본 논문에서는 파워 MOSFET와 펄스 트랜스포머를 이용한 사이라트론 드라이버회로를 설계하고 특성을 보았다. 출력 펄스 전압과 전류는 1.3kV, 4.1A이고 펄스폭은 1 μs으로써 서론에서 보인 그리드 2의 설계사양을 만족하면서 사이라트론을 트리거 시킬 수 있는 전압, 전류, 펄스폭이다. 동작 시험한 결과 안정된 동작을 하는 것은 확인됐다. 향후 과제로는 1.5kV이상의 펄스전압, 10A이상의 높은 전류등을 요구되고. 또 더 적은 지터를 보장하는 드라이버 설계가 필요하다고 생각된다.

[참고 문헌]

- [1] L.W. Springer, T.W. Karras, R.S. Anderson, and B.G. Bricks, IEEE IPPC, 1976, Lubbock, Texas, Proceeding, IIC1-1, 1976
- [2] Geun-Hie Rim, Hong-Sik Lee, Pavlov E. P., Won-Ho Kim, Chu-hyun Cho, Young-Wook Choi, "Fast high voltage pulse generation using nonlinear capacitors" Proceedings of the 12th IEEE IPPC, vol 2, pp1460-1463., 1999
- [3] "Hydrogen Thyatron Preamble", English Electric Valve Company Limited, chelmsford, Essex CM12QU, United Kingdom, pp1-50, 1972
- [4] S. Friedman, R.F.Caristi, "Users' guide to thyratrons for laser applications", Laser Focus/Electro-Optics, pp 70-75, 1987
- [5] J. V. Hill, D. G. Ball, and D. N. Garrett, "Reliable, High Repetition Rate Thyatron Grid Driver Used with a Magnetic Modulator", Proceedings of the 8th Pulsed Power Conference, pp961-963, 1991
- [6] R. J. Adler, and R. J. Richter-Sand, "Development of New Thyatron Drivers", Proceedings of the 20th Power Modulator Symposium, pp413-415, 1992
- [7] P. Creely, S. Ball, R. Hitchcock, "Integrated Thyatron Driver for High Rep-Rate, High-Power Modulators", Proceedings of the 18th Power Modulator Symposium, pp80-83, 1993
- [8] O. I. Buzhinskii, A. V. Efimov, and A. A. Slivitsii, Sov. J. Vuantum electron., 1982
- [9] G. N. Glasoe, J. V. Lebacpz, "Pulse Generator", Bational Defense Research Committee, pp532-562, 1948
- [10] Reuben Lee, et al., "Stabilization of High-Power Copper Vapour Laser", Optical and Quantum Electronics 23, ppS458, 1991
- [11] J. A. Dinkel, C. C. Jensen, "Comparison of feerite materials for pulse applications", IEEE 9th IPPC, pp300-303, 1993