

論文97-34S-4-8

자기(磁氣) 압축회로를 이용한 고효율 단(短)펄스 전원모듈 개발

(A high-efficiency short-pulse generator module using magnetic compression circuit)

權純杰*, 金復權**, 이스토민***, 林根熙***

(Soon-Kurl Kwon, Bog-Kwon Kim, Istomin-Y.A, and Geun-Hie Rim)

요 약

최근 산업발달과 환경에 대한 관심의 고조로 electron beam process나 pulsed corona process를 위한 평균전력 100[KW], 피크 펄스전압 150[KV], 펄스폭 500[ns], 반복주파수 500[Hz]의 고전압 고속펄스 전원장치가 요구되고 있다. 이러한 전원장치에는 주 스위칭 소자로서 자기스위치가 유효하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 자기스위치의 설계원리를 기술하였으며, 3단의 자기 펄스발생기를 제안하여 동작원리를 설명하였다. 또한 10[J/pulse]급의 자기 펄스발생기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 방식의 타당성을 입증하였으며, 부하단에서 500[ns](FWHM), 82[%]의 에너지 전송효율을 얻었다.

Abstract

Recently, high-developed domestic industry and environmental issues demand high-voltage short-pulse power supply(power, voltage, pulse width and repetition rate of 100KW, 150KV, 500ns and 500Hz, respectively) for electron beam process and pulse corona process. In such power supplies magnetic compression circuit can be one of the effective solutions. In this study design and operation principle of a pulse-power supply with a three-stage magnetic-compression circuit are described. A good agreement between simulation and experimental results verifies the validity of the scheme. The system delivers energy of 10[J/pulse] at the efficiency of 82[%].

I. 서 론

고전압 펄스파워에 의한 1차 에너지변환은 고에너지 밀도 플라즈마, 전자기속, 전자빔, 이온빔, 방전용의 전원장치에 적용될 수 있으며, 2차, 3차, 4차의 에너지 변환을 통해서 새로운 이용분야가 개척되고 있다.^[1,2] 이러한 응용장치에 적용할 수 있는 고반복동작, 단펄스

(short pulse), 고풍력 펄스파워 전원장치에 사용이 가능한 주 스위칭 소자로서 Hydrogen thyatron이 있다. Thyatron은 고전압 대전류를 고속으로 스위칭 할 수 있고 넓은 범위의 반복주파수에서 동작하는 능력을 갖고 있기 때문에 자기스위치를 부가한 자기 어시스트(magnetic assist)법으로 널리 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 Thyatron은 대전력의 빠른 turn-on시간에 응답하여 스위칭할 때 전극의 열화로 인하여 수명이 단축되기 때문에 고반복 스위칭용도로는 부적당하다.^[3,4]

이러한 수명의 문제를 해결하기 위한 것이 포화인덕터의 비선형특성을 이용한 자기스위치이다.^[5] 자기스위치는 단펄스, 빠른 펄스 상승시간 및 전류증폭을 위해서, 느린 스위칭 속도나 저전압에서 동작하는 Thyatron 또는 SCR, IGBT, GTO와 같은 전력용

* 正會員, 慶南大學校 電氣工學科

(Kyungnam University)

** 正會員, 大田技能大學 電氣學科

(Taejon Polytechnic College)

*** 正會員, 韓國電氣研究所

(KERI)

接受日字: 1996年9月19日, 수정완료일: 1997年4月15日

반도체소자와 결합되어 사용될 수 있으며, 에너지를 압축시키는 자기펄스 압축방식(magnetic pulse compression)에 이용된다.^{16,71}

대전력 스위칭소자로서 강자성체의 비선형특성을 사용할 수 있다는 가능성은 1940년경부터 시작되었으며, W. S. Melville는 1951년에 주파수 응답속도 및 손실 등에서 뒤떨어지는 특성을 갖는 자기재료를 이용한 포화인덕터를 사용하여 펄스압축방식을 적용시킨 레이더용 전원장치를 개발하는데 처음 사용하였다.¹⁸¹ 이후에 자기특성이 우수한 비정질 자성재료의 개발로 대용량 엑시머 레이저 여기용 및 가속기 여기용 전원장치의 단펄스 고반복 고출력 펄스발생기에 사용되었다.¹⁹¹ 또한 최근에는 electron beam process나 pulsed corona process에 의해 화석연료의 연소시에 배출되는 NO_x와 SO₂를 처리하고자 평균전력 100 [KW] 피크펄스전압 150 [KV], 펄스폭 500 [ns], 반복주파수 500 [Hz]의 펄스발생기의 스위칭소자로 자기스위치를 적용하고자 하는 관심이 집중되고 있다.¹¹⁰¹

일반적으로 자기 펄스발생기는 Melville가 제안한 2~4단의 자기스위치 모듈을 직렬 접속하여 사용되고 있다. 그러나 에너지 전송효율은 Metal-glass alloy 코어를 기본으로 하는 자기 펄스발생기에서도 60~70 [%] 정도로^{11,121} 낮기 때문에 문제점으로 지적되고 있다.

본 논문에서는 자기 펄스발생기의 효율향상을 위해 자기스위치의 출력특성을 고찰하고, 3단의 자기 펄스발생기를 제안하여 동작원리를 설명한다. 또한 10 [J/pulse] 급의 자기 펄스발생기 모듈을 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션과 제작 및 실험을 통하여 제안한 원리와 효율향상 방안의 타당성을 입증한다.

II. 기본 설계원리와 효율 향상기법

1. 기본 설계원리

자기스위치에 사용되는 자기재료는 자구(magnetic domain)의 방향이 단방향으로 나타나는 강자성체로서 히스테리시스 곡선이 구형이어야 한다. 이러한 강자성체의 비선형특성을 이용하는 자기스위치의 기본설계는 식 (1)에 의한다.

$$\Delta B_k = \frac{1}{N_k A_k} \int_0^{t_{sat}} V_{Ls,k}(t) dt \quad [T] \quad (1)$$

여기서 첨자 k(=1,2,3...)는 적용되는 자기스위치 모듈의 단 수이며, ΔB는 자속밀도변화, N은 자기스위치 코어의 권회수, A는 코어의 단면적, V_{LS}는 자기스위치에 가해지는 전압이고 t_{sat}는 자기스위치의 포화시간이다.

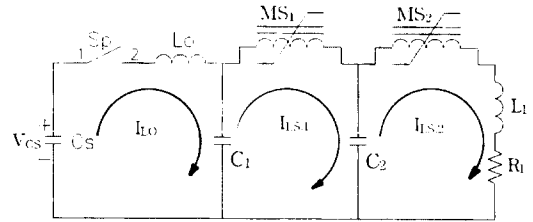
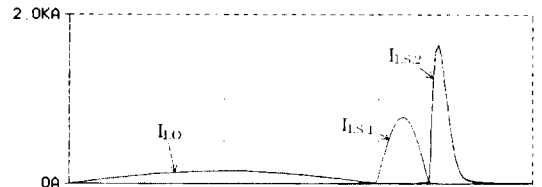
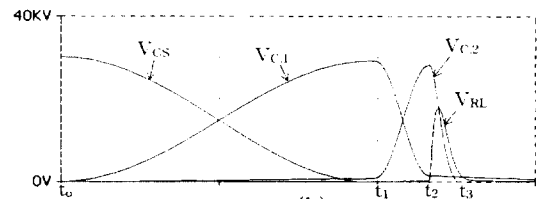


그림 1. 자기 펄스발생기의 기본 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of magnetic pulse generator.



(a)



(b)

그림 2. 각 요소의 전압파형과 전류파형 (a)전류파형 (b)전압파형

Fig. 2. Voltage and current waveforms of each element. (a)current waveform (b)voltage waveform

그림 1은 자기스위치 모듈로 구성된 자기 펄스발생기의 기본 등가회로이며, 그림 2는 각 단의 전압파형과 전류파형이다. 그림 1에서 C₁과 MS₁은 첫 번째 자기스위치 모듈이고 C₂와 MS₂가 두 번째 자기스위치 모듈이며, 커패시터 C₅와 단락스위치 Sp 그리고 선형인덕터 L₀는 첫 번째 자기스위치 모듈에 에너지를 공급하는 충전부이다. 또한 L_L과 R_L은 부하단의 인덕턴스와 저항이다.

그림 1의 동작원리는 초기에 충전커패시터 C_S 가 임의의 에너지로 저장되어 있다면 다음과 같다.

단락스위치 Sp 가 주어진 시간동안 투입되면 선형인덕터 L_0 를 통하여 흐르는 공진전류 I_{L0} 는 그림 2의 $t_0 \sim t_1$ 시간 동안 흐르게 되며, 이때 첫 번째 자기스위치 MS_1 이 불포화 상태라면 불포화 인덕턴스는 $L_{0,1}$ 은 매우 커서 자기스위치 MS_1 은 off 상태가 되므로 커패시터 C_1 으로 충전된다.

그 후 커패시터 C_1 이 충전을 완료하는 시점인 t_1 시간에 자기스위치 MS_1 이 포화되면 포화인덕턴스는 $L_0 \gg L_{s,1}$ 로 되므로 충전시간 $t_0 \sim t_1$ 보다 짧은 $t_1 \sim t_2$ 시간동안 $I_{L,s,1}$ 의 전류가 흘러 다음 단으로 에너지를 전송하여 에너지를 압축시키는 작용을 한다. 이러한 작용은 부하단까지 연속해서 이루어 질 수 있도록 점차 줄어드는 포화인덕턴스 값을 갖도록 설계되어야 한다.

각 자기스위치의 불포화인덕턴스 $L_{U,k}$ 와 포화인덕턴스 $L_{S,k}$ 는 다음의 식 (2), (3)에 의해 계산된다.

$$L_{U,k} = \frac{\Delta B_k}{\Delta H_k} \cdot \frac{A_k N_k^2}{l_k} = \mu_0 \mu_{r,k} \frac{A_k N_k^2}{l_k} \quad (2)$$

$$L_{S,k} = \mu_0 \mu_{s,k} \frac{A_k N_k^2}{l_k} \quad (3)$$

그리고 자기스위치의 포화시간 $t_{sat,k}$ 는 식 (4)와 같다.

$$t_{sat,k} = \frac{2\Delta B_k N_k A_k}{V_{Ls,k}} \quad (4)$$

여기서 l 은 코어의 평균 자로길이이며, μ_0 는 진공 중의 투자율, μ_r 과 μ_s 는 각 코어의 불포화와 포화시 비투자율이고, 포화시의 비투자율은 고전압 포화인덕터에서 일반적으로 3~5가 적용된다.^[4]

식 (3)에서 자기스위치의 포화인덕턴스 $L_{S,k}$ 는 다음의 식과 같이 피크 전류값과 펄스폭 및 펄스 압축비를 결정하는 중요한 파라미터이며, 이것은 일반적으로 코어의 권회수 N 의 조정에 의한다.

$$\text{임피던스} : Z_k = \sqrt{\frac{L_{S,k}}{C_k}} \quad [\Omega] \quad (5)$$

$$\text{피크전류} : I_{C,k} = V_{C,k} \sqrt{\frac{C_k}{L_{S,k}}} \quad [A] \quad (6)$$

$$\text{펄스폭} : \tau_k = \pi \sqrt{L_{S,k} C_k} \quad [\mu s] \quad (7)$$

2. 효율 향상기법

주어진 자기스위치 코어의 조건에서 역바이어스 전

류를 코어에 가하면 자속밀도변화 ΔB 는 식 (9)와 같이 $2B_S$ 로 할 수 있다. 따라서 코어의 단면적을 줄일 수 있음은 물론이고, 출력펄스의 안정화를 기할 수 있다. 이때 역바이어스 전류에 의한 자계의 세기 H_C 는 식 (10)과 같다.

$$\Delta B_k = B_S - (-B_r) = 2B_S \quad [T] \quad (9)$$

$$H_{C,k} = \frac{N_{b,k} \cdot I_{b,k}}{l_k} \quad [AT/m] \quad (10)$$

여기서 B_S 와 B_r 은 각각 포화자속밀도와 잔류자속밀도이며, N_b 와 I_b 는 역바이어스 권회수와 역바이어스 전류이다.

에너지 전송효율의 향상은 자기스위치의 포화시간을 앞당기므로써 이를 수 있으며^[8,12], 포화시간은 식 (4)에 나타난 각 파라미터의 조정으로 가능하다. 여기서 자속밀도변화 ΔB 는 자계의 세기 H_C 에 관계되므로 포화시간은 역바이어스 전류에 의하여 조정이 가능하다.

그림 3은 1단의 자기 펄스발생기에서 역바이어스 전류 I_b 및 코어단면적을 함수(Ac/A_{max})로 한 경우, 각각의 에너지 전송효율(W_o/W_{cs})관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 코어단면적과 역바이어스 전류에 의하여 에너지 전송효율이 변화함을 알 수 있으며, 그림 3에서 역바이어스 전류가 3 [A]인 경우에는 코어단면적이 0.85에서 최적의 효율을 얻을 수 있다.

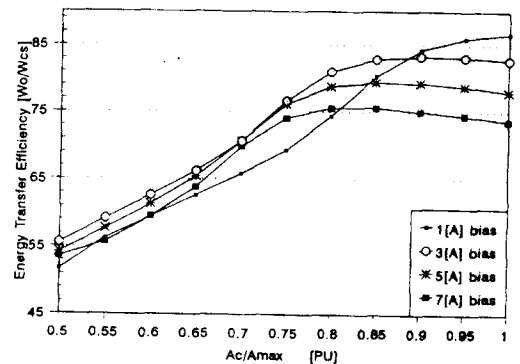


그림 3. 역바이어스 전류와 코어단면적을 함수로 한 경우의 에너지 전송효율

Fig. 3. Energy transfer efficiency as a function of core cross section area for various reverse bias currents

자기 펄스발생기에서 원하는 펄스 압축비를 얻기 위해 필요한 코어의 체적은 식 (11)과 같으며^[4], 코어의

체적은 전송에너지 W_k 와 압축비 g_k 에 비례한다.

$$M_k = A_k l_k = \frac{2\mu_0 \mu_{sk} \gamma_k g_k}{(1 + \lambda_{k+1})(\Delta B_k)^2 (\eta_k)} W_k \quad [m^3] \quad (11)$$

여기서 g_k 는 펄스 압축비이고, γ_k 는 포화시간, η_k 는 효율, W_k 는 펄스당 에너지이며, $\lambda_{k+1} = C_k / C_{k-1}$ 이다.

그림 4는 1단 자기 펄스발생기의 주어진 코어단면적에서 입력에너지를 함수로 한 경우, 에너지 전송효율과 입출력 전압비 및 펄스 압축비의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 주어진 코어단면적에서 입력에너지가 감소할수록 에너지 전송효율과 입출력 전압비는 감소하지만 압축비는 증가한다. 이것은 식 (3)의 포화인덕턴스의 감소와 관련지어 생각할 수 있다.

결국 역바이어스 전류에 의하여 지속밀도변화 ΔB 를 제어할 수 있으며, 따라서 압축비나 에너지 전송효율 등의 출력제어가 가능하다.

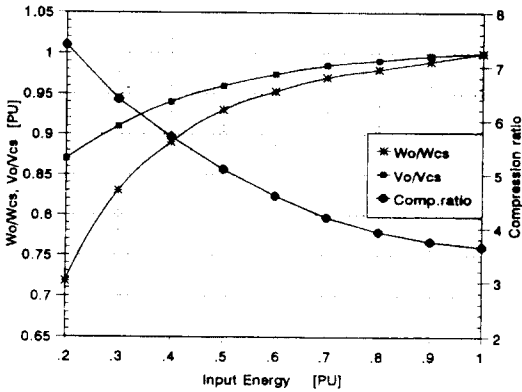


그림 4. 주어진 자기스위치의 입출력 특성
Fig. 4. Input/Output characteristics for given magnetic switch

III. 제안한 자기 펄스발생기의 동작원리와 시뮬레이션

1. 설계 파라메타

그림 5는 제안한 자기 펄스발생기의 등가회로이다. 여기서 C_1 과 MS_1 , C_2 와 MS_2 , C_3 와 MS_3 가 각각 3단의 자기스위치 모듈이다. 또한 이 회로에서 C_1 과 C_2 의 조합을 휘치회로(Fitch circuit)라고 한다.

C_s 는 104 [nF], 15 [[KV] 로서 약 10 [J/pulse] 급으로 설계하였으며, 단락스위치 Sp 는 펄스폭 32 [μ s], 반복주파수는 500 [Hz]로 동작한다. 그리고 선형

인덕터 L_0 는 공진주파수와 일치하도록 설계되어야만 스위치 Sp 의 off시에 스트레스를 줄일 수 있으며, 여기서 2 [mH]이다. 또한 커패시터 C_1 과 C_2 는 52 [nF]이고 C_3 는 25 [nF]이다.

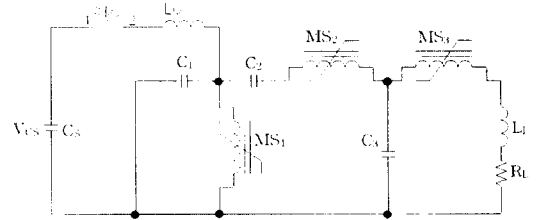


그림 5. 제안한 자기 펄스발생기의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of the proposed magnetic pulse generator.

표 1은 자기스위치의 설계 파라메타이며, 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PSpice의 "core model"의 파라메타로 이용하였다. 여기서 각 코어의 단면적은 12 [cm²]로 계산되었으나 그림 3의 결과를 적용하여 10 [cm²]로 하였다.

표 1. 자기스위치 설계파라메타

Table 1. Design parameter of the magnetic switch.

parameter	stage	MS ₁	MS ₂	MS ₃
단 면 적	A[cm ²]	10	10	10
평균자로길이	l[cm]	12.7	12.7	12.7
권회수	N[turn]	80	30	8
자속밀도	ΔB [T]	3	3	3
역바이어스 권회수		1	1	1
역바이어스전류	[A]	3	3	3
권선저항	R[Ω]	1.5	0.7	0.5

2. 동작 원리

그림 6은 자기스위치에 사용된 코어의 B-H곡선 모델이다. 각 코어의 초기 자속밀도는 충전커패시터 C_s 의 극성에 따라 달라지며, 충전커패시터 C_s 의 극성이 (-)라면 초기자속밀도는 그림 6과 같이 MS_1 은 그림 (a), MS_2 와 MS_3 는 그림(b)가 적용된다. 그리고 C_s 의 극성이 (+)라면 그 반대가 되어야 한다.

그림 7은 제안한 자기 펄스발생기에서 각 단의 전류와 전압파형을 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 충전단의 전압파형 V_{cs} 와 커패시터 C_1 을 통하는 전류 $I_{c,1}$ 으로서 자기스위치 MS_1 , MS_2 에 의해 압축되는 전류파형 $I_{L,1,1}$, $I_{L,2,2}$ 를 동시에 관측할 수 있다. (b)는 커패시터

C₁ 양단의 전압파형이며 (c)는 커패시터 C₂ 양단의 전압파형이고 (d)는 커패시터 C₃와 부하저항 R_L에 가해지는 전압파형이다.

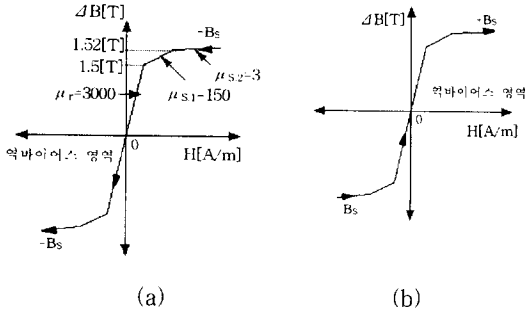


그림 6. 자기스위치 코어의 B-H곡선 모델
Fig. 6. B-H loop model of magnetic switch core.

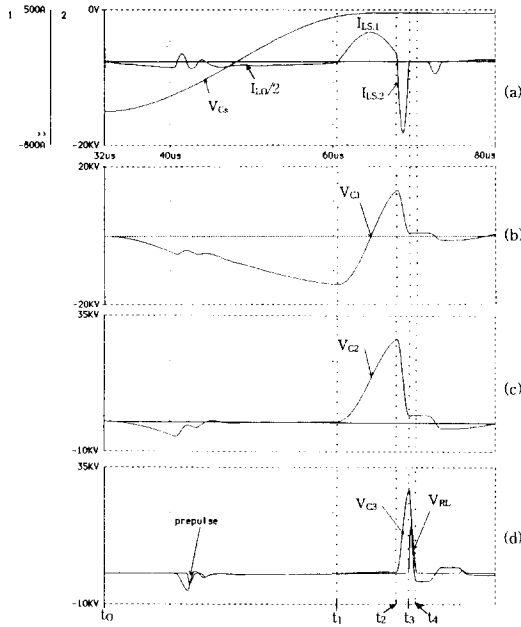


그림 7. 각 단의 동작파형
Fig. 7. Operating waveforms at each stage.

여기서 충전단 커패시터의 전압은 -V_{CS}이며, 동작원리를 설명하기 위해 각각의 동작모드로 구분하여 나타내었으며, 부하단의 등가저항이 시스템의 등가임피던스에 비해서 크다면 다음과 같은 4개의 모드로 순차적으로 동작한다.

(1) 동작 mode I. (t₀ ~ t₁)

loop 1 : C_s - C₁ - L₀ - Sp - C_s

loop 2 : C_s - C₃ - MS₂ - C₂ - L₀ - Sp - C_s

loop 3 : C₃ - R_L - L_L - MS₃ - C₃

모드 1은 그림 7에서 (t₀~t₁)구간이며 위와 같이 3개의 전류루프로 동작한다.

그림 5에서 단락스위치 Sp가 투입되면 C_s에 저장되어 있던 에너지는 선형인덕터 L₀를 통하여 커패시터 C₁과 C₂가 충전되며, 이때 L₀를 흐르는 공진전류는 I_{L0} = I_{C1} + I_{C2}가 된다.

여기서 I_{C1}은 자기스위치 MS₁이 포화상태에 있으므로 I_{L0}/2로 커패시터 C₁으로 충전되며, I_{C2}는 V_{CS}의 극성이 (-)이므로 그림 6(b)와 같이 V_{CS}의 극성과 코어의 초기자속밀도 극성이 같은 방향에 있게 되어 μ_{s2}에 의한 누설전류가 흐르게 되며, 결국 포화점 부근의 작은 자속밀도변화(1.52-1.5=0.02T)에 의해서 부분포화를 한다. 또한 loop 2의 전류는 C₃를 충전하게 되고 MS₃의 초기자속밀도 MS₂와 마찬가지로 V_{CS}와 같은 방향에 있으므로 더욱 낮은 인덕턴스 L_{s3}에 의하여 loop 2와 같이 부분포화되며, 이 전압은 부하에서 prepulse 전압으로 나타나며 효율저하의 원인이 된다.

(2) 동작 mode II. (t₁ ~ t₂)

loop : C₁ - L_{s1} - C₁

커패시터 C₁의 전압이 (-)피크값에 도달하는 t₁순간에 자기스위치 MS₁은 포화되며, 포화인덕턴스는 L₀ ≫ L_{s1}이 되므로 식 7에 의해 (t₀~t₁)구간 보다 짧은 시간동안에 C₁에 저장되었던 에너지를 반대극성으로 충전한다. 이때 V_{C1}의 극성이 반전되므로 V_{C2}의 전압은 그림 7(c)와 같이 전원전압인 V_{CS}의 약 2배의 전압으로 상승하여 자기스위치 MS₂에 공급된다.

(3) 동작 mode III. (t₂ ~ t₃)

loop : C₁ - C₂ - L_{s2} - C₃ - C₁

C₁과 C₂에 저장되어 있던 에너지는 자기스위치 MS₂가 포화되면 포화인덕턴스는 L_{s1} ≫ L_{s2}가 되므로 (t₁~t₂)구간 보다 짧은 시간동안에 C₃로 방전된다.

(4) 동작 mode IV. (t₃ ~ t₄)

loop : C₃ - R_L - L_L - L_{s3} - C₃

mode IV는 부하에 에너지를 공급하는 모드이며, 커패시터 C₃에 충전된 에너지는 자기스위치 MS₃가 포화되면 포화인덕턴스는 L_{s2} ≫ L_{s3}가 되므로 (t₂~t₃)구간 보다 더욱 짧은 펄스폭의 에너지로 압축되어 부하에 공급된다. 이때 부하단의 인덕턴스 L_L은 펄스폭에 영향을 주므로 주의해야 한다.

부하단에서 최대 에너지 전송효율을 얻기 위해서는

임피던스 매칭($Z_C = R_L$)을 고려해야 한다. 만약 부하 임피던스가 시스템의 등가임피던스 Z_G 보다 작으면 잔여 에너지는 앞의 동작 모드 역순으로 전원으로 귀환하며 무효전력이 증가하여 부하단에서 낮은 효율로 나타난다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 8은 제한한 자기 펄스발생기의 시뮬레이션 한 전압과 전류파형이다. (a)는 선형인덕터 L_0 와 각 단의 자기스위치 MS_1, MS_2, MS_3 에 의하여 압축된 전류파형으로서 피크전류는 충전단에서 부하단까지 73 [A], 291 [A], 711 [A], 1400 [A]로 압축되는 것을 볼 수 있으며, 이때 각 파형의 펄스폭은 32 [μs], 9 [μs], 1.6 [μs], 0.5 [μs]이다. (b)는 각 단 커패시터 양단의 전압파형이며, 각 단의 피크전압은 충전단 전압 V_{CS} 에서부터 부하단 까지 15 [KV], 14 [KV], 27.3 [KV], 27.3 [KV], 16.4 [KV]로 나타났다. 그리고 이 시뮬레이션 결과는 각 자기스위치의 포화시간을 약 10 [%] 정도 앞당긴 결과이다.

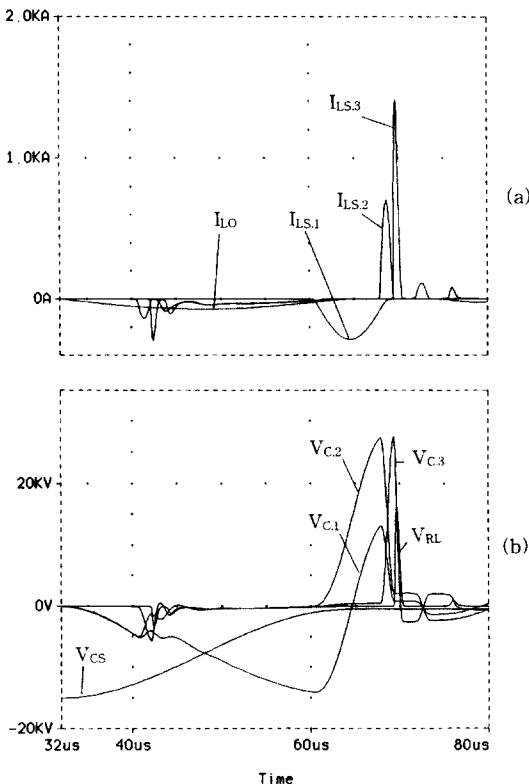


그림 8. 각 모드의 전압파형과 전류파형 ($R_L=11.5[\Omega]$)
Fig. 8. Voltage and current waveforms at each mode. ($R_L=11.5[\Omega]$)

그림 9는 부하저항 R_L 이 7.8 [Ω], 11.5 [Ω], 22 [Ω]인 경우 부하단의 전압파형 V_{RL} 과 전류파형 I_{RL} 그리고 펄스당 에너지 W_{RL} 을 나타낸 것으로 부하의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있으며, 부하단의 펄스 폭은 500 [ns] (FWHM)이다.

표 2에는 부하저항 R_L 이 11.5 [Ω]인 경우 동작특성을 나타내었다

표 2. 부하저항 11.5 [Ω]인 경우 동작특성
Table 2. Operational characteristics for the load of 11.5 [Ω].

parameter	I_{L_0}	MS_1	MS_2	MS_3	R_L
피크 전류[A]	73	291	711	1400	1400
펄스 폭 [μs]	32	9	1.5	0.5	0.5(FWHM)
피크 전압[KV]	15	14	27.3	27.3	16.4
압축비	.	3.6	6	3	.
입력 에너지[J]	11.7	10.5	10.4	9.96	9.88
효율 [%]		89.7	88.8	85.1	84.4

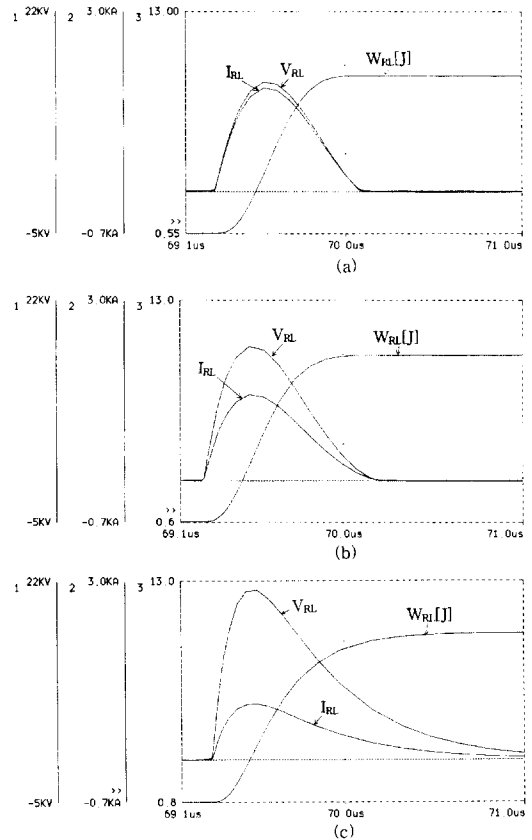


그림 9. 부하단의 전압과 전류파형과 에너지 (a)7.8[Ω] (b)11.5[Ω] (c)22[Ω]
Fig. 9. Voltage and current waveforms and the energy for the various loads. (a)7.8[Ω] (b)11.5[Ω] (c)22[Ω]

IV. 시스템 구성 및 실험 결과

1. 시스템 구성

시스템의 제작은 표 1에 나타난 설계파라미터를 이용하여 구성하였다.

자기스위치에 사용된 코어는 폭 2.5 [cm] 두께 25 [μ m]의 박판을 폴리에스터 절연테이프로 층간 절연한 단면적 2 [cm²]의 트로이달형 유니트코어 5개를 1 모듈로 한 Metglas 9KCP 코어를 사용하였으며, 각 코어의 권회수는 첫 번째 단부터 80, 30, 8 turn이다. 그리고 역바이어스 회로의 권회수는 1 turn으로 구성하였고, 코어의 균일한 전계를 위해 2조의 코일을 병렬로 권선하였으며, 이때 전압과 전류의 스트레스도 줄일 수 있다.

각 단의 커패시터는 시스템 내의 인덕턴스에 영향을 주지 않는 BaTiO₃계의 고전압 무인덕턴스 세라믹 커패시터(30KV, 3nF)를 병렬 접속하여 사용하였다.

또한 코어, 코일, 커패시터 등에서의 손실은 온도에 많은 영향을 받으므로, 절연과 방열을 위해 절연유로 채워진 챔버 내에 설치하였다.

각 단의 전압파형과 전류파형은 각각 저항분압식 고전압 프로브와 로고스키(Rogowski)코일을 제작하여 LeCroy 디지털 오실로스코프를 사용하여 관측하였으며, 오실로스코프는 외부영향을 줄이기 위해 차폐시설을 하였다.

표 3에는 각 단 자기스위치 모듈의 파라미터를 나타내었다.

표 3. 각 단 자기스위치 모듈의 파라미터
Table 3. Parameter of each stage magnetic switch mouldle.

stage	τ [μ s]	V [KV]	C [nF]	Magnetic Switch						
				core type	ΔB [T]	N [turn]	A [cm]	size	Ls [μ H]	I _s [KA]
MS ₁	9	15	52	9KCP	3	80	10	54x30x (10x5)	160	0.3
MS ₂	1.5	30	52	9KCP	3	30	10	54x30x (10x5)	20	0.7
MS ₃	0.5	30	25	9KCP	3	8	10	54x30x (10x5)	1.9	1.5

2. 실험 결과

그림 10의 (a), (b), (c)는 부하저항이 11.5 [Ω]인 경우 각 커패시터 양단의 전압파형과 첫 번째 모듈 커패시터 C₁을 통하는 전류파형 I_{C1}을 나타낸 것이다. 이 I_{C1}의 전류에 의하여 자기스위치 MS₁, MS₂에 의해 압축되는 전류 I_{LS1}과 I_{LS2}을 동시에 관측할 수 있으므로

커패시터 C₁에만 로고스키 코일을 설치하여 측정장치를 간소화하였다. (a)는 충전커패시터 C_s양단의 방전 전압파형과 C₁을 통하는 전류파형 I_{C1}이며, (b)는 커패시터 C₁ 양단의 전압파형과 전류파형이며, (c)는 커패시터 C₂ 양단의 전압파형과 전류파형 I_{C1}이다.

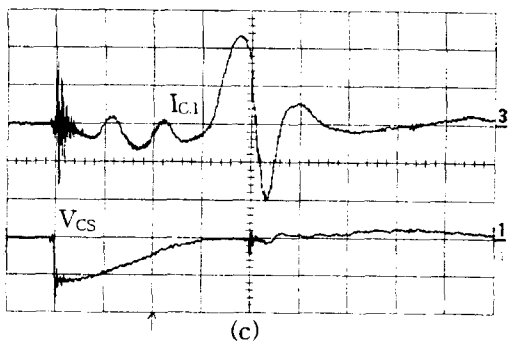
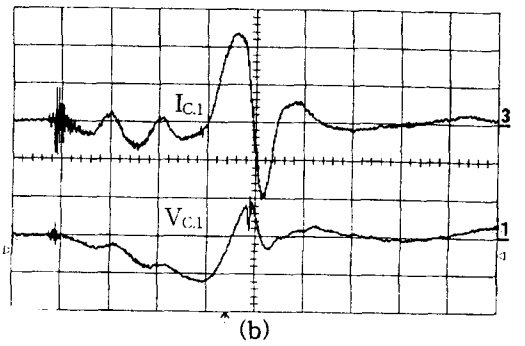
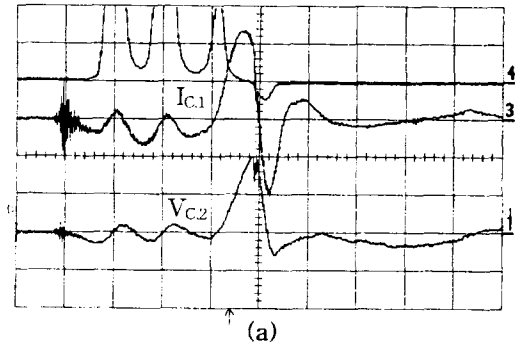
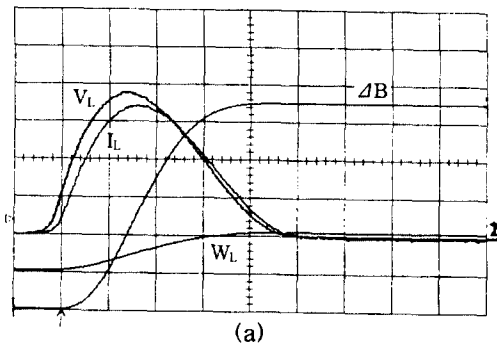


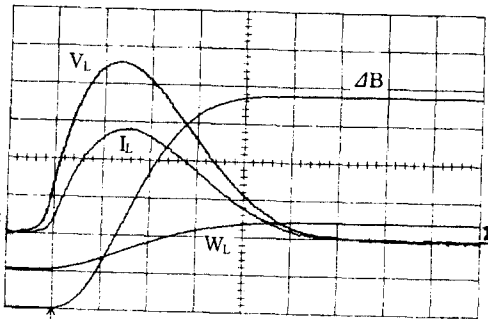
그림 10. 각 단의 전압파형과 전류파형 (a)V_{Cs}, I_{C1} (b)V_{C1}, I_{C1} (c)V_{C2}, I_{C1} [time (10 μ s/div), V_{Cs}(12.5KV/div), V_{C1}(12.5KV/div), V_{C2}(12.5KV/div), I_{C1}(120A/div)]

Fig. 10. Voltage and current waveforms at each stages.

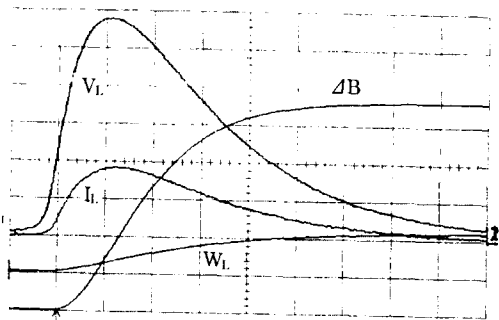
(a)V_{Cs}, I_{C1} (b)V_{C1}, I_{C1} (c)V_{C2}, I_{C1} [time 10 μ s/div, V_{Cs}(12.5KV/div), V_{C1} (12.5KV/div), V_{C2}(12.5KV/div), I_{C1} (120A/div)]



(a)



(b)



(c)

그림 11. 부하단의 전압과 전류파형, 에너지 (a)7.8[Ω] (b)11.5[Ω] (c)22[Ω] [time(0.2μs/div), W_L(6J/div), I_L(0.5KA/div), V_L(3.35KA/div)]

Fig. 11. Voltage and current waveforms and the energy for the various loads.

(a)7.8[Ω] (b)11.5[Ω] (c)22[Ω] [time(0.2μs/div), W_L(6J/div), I_L(0.5KA/div), V_L(3.35KA/div)]

C_s의 충전부에서 공급되는 15KV, 32 [μs]의 장 펄스 전압은 첫 번째 자기스위치 MS₁에 의해 30 [μs]에서 포화되며, 이때 32 [μs]의 펄스폭은 자기스위치 MS₁의 포화인덕턴스 160 [μH]에 의해 9 [μs]로 압축되고 있다. 그리고 MS₂의 포화인덕턴스 20 [

μH]에 의해 1.5 [μs]로 압축되는 것을 알 수 있다. 그림 11은 부하단의 저항이 각각 7.8 [Ω], 11.5 [Ω], 22 [Ω]인 경우 부하에서 적용되는 전압파형 V_L과 전류파형 I_L 그리고 에너지 W_L을 나타낸 것이다. 부하저항이 증가함에 따라 피크전류는 감소하고 피크전압은 상승하는 것을 관찰 할 수 있다. 여기서 부하단의 전압과 전류파형의 펄스폭은 부하저항의 값에 따라 변화하므로 펄스폭은 최대값의 1/2값에서의 폭으로 나타내며, 충전부의 32 [μs] 펄스폭이 부하단에서 500 [ns]로 압축되었으며, 시뮬레이션 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 시스템의 출력특성을 고찰하기 위한 것으로서, 입력전압 V_{CS}가 14 [KV], 15 [KV], 16 [KV]인 경우 각 부하저항에서의 에너지 전송효율과 출력전압을 나타낸 것이다. 여기서 각 부하저항에서 입력전압이 15 [KV]인 경우가 에너지 전송효율이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 입력전압 15KV, 부하저항 11.5 [Ω]인 경우에는 부하단의 에너지 전송효율은 82 [%], 출력전압은 15.2 [KV]로 나타났다.

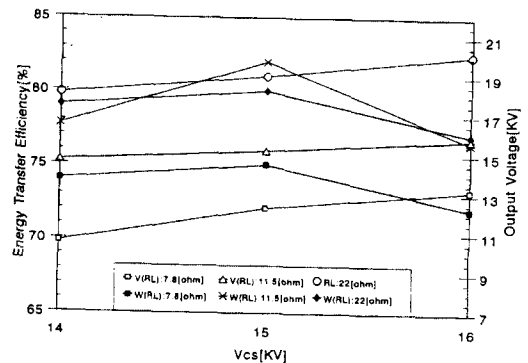


그림 12. 입력전압의 변화에 대한 출력전압과 효율 특성

Fig. 12. Output voltage and efficiency versus input voltage variation.

V. 결 론

3단의 자기 펄스발생기를 제안하여, 그 동작원리를 기술하고 10 [J/pulse]급 자기 펄스발생기를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, Metglas 9KCP 코어를 사용한 시작품을 제작과 실험을 통하여 제안한 원리의 타당성을 입증하고 출력특성을 고찰하였다.

시뮬레이션 결과 주어진 자기스위치 모듈의 최적효율은 주어진 코어 단면적의 0.85에서 얻을 수 있으며, 또한 역바이어스 전류에 의하여 효율의 제어가 가능함을 알 수 있었다.

제작된 자기 펄스발생기는 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였으며, 부하저항이 11.5 [Ω] 인 경우 82 [%]의 에너지 전송효율과 출력전압 15.2 [KV], 펄스폭 500 [ns] (FWHM)의 결과를 얻었다.

향후, 본 시스템의 충전부를 대용량화하고 개발된 모듈의 stack 화를 통하면 400 [J] 급의 출력전압 150 [KV], 반복주파수 500 [Hz] 이상의 대용량 고효율 단(短)펄스발생기(500 [ns])의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Kristiansen, "Pulsed Power Applications", IPEC-Yokohama, pp: 1391-1396, 1995.
- [2] 原 雅 廬, 秋 山 秀 典, "高電壓ノパルスパワー工學", 森北出版株式會社, 1994.
- [3] D. L. Birk, E. J. Lauer, L. L. Reginato, D. Rogers, M. W. Smith, T. Zimmerman, "Experiments in Magnetic Switch", Proceeding of the 3rd IEEE International Pulse Power Conference, pp.262-268, 1981.
- [4] Л.А.Меерович, "Магнитные генераторы импульсов", Советское Радио, Москва, 1968.
- [5] W. James Sarjeant and R. E. Dollinger, "High-Power Electronics", TAB BOOKS Inc, 1989.
- [6] ГетманД.В, ИстоминЮ.А. "Исследование магнитных свотв прецизионных магнитных сплавов 2НСР и 9 КСР", С.Петербург, НИИЭФА, тех отчет.1995.
- [7] В.В.Кремлев, Г.А.Месяц "Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике", Новосибирск, Наука, 1987.
- [8] 김복권, 권순걸, 임근희, 이스토민, "회치회로에 자기스위치를 적용한 자기 펄스발생기의 동작특성", 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, pp. 729-732, 1996
- [9] W. S. Melville, "The use of saturable reactors as discharge devices for pulse generators", Proceedings Institute of Electrical Engineers(London) vol.98, part3 (radio and communication), pp. 185-208, 1951.
- [10] Osamu Kobayashi, Koji Noda, Tsutomu Shimada, and Minoru Obara, "High Power repetitive excimer lasers pumped by an all solid state magnetic exciter", SPIE Vol:622 pp:11-117, 1986.
- [11] B. M. Penetrante, "Pollution control application of pulsed power technology", 9th IEEE pulsed power Conference pp:1-5 1993.
- [12] S. E. Ball, "Optimum Switching Time For Magnetic Switch", IEEE Pulsed Power Conf, pp:86-89, 1988.
- [13] Hiroshi Tanaka, Hidekazu Hatanaka, Minoru Obara, "High-efficiency, all-solid-state exciters for high-repetition-rated, high-power TEACO2 lasers", Rev.Sci. Instrum, Vol.61, No.8, pp:2092-2096, 1990.

저 자 소 개

權 純 杰(正會員) 第33卷 B編 第 10號 參照
 현재 경남대 공대 전기공학과 교수



金 復 權(正會員)

1957年 3月 2日生. 1978年 인천
 기능대 전기과 졸업. 1989年 2月
 경남대 공대 전기공학과 졸업(공
 학사). 1992年 8월 경남대 대학원
 전기공학과 졸업(공학석사). 1997
 年 2月 경남대 대학원 전기공학과
 졸업(공학박사). 현재 대전기능대 전기학과 조교수. 주
 관심분야는 전력전자 및 펄스파워 등임.



Y. A. Istomin(正會員)
 1943年生. 1986년 NIIEFA 졸업
 (공학박사). 1968년~현재 NIIEFA
 실장. 1996년 한국전기연구소 전
 력변환연구팀 초빙연구원. 주관심
 분야는 펄스파워 등임.

林 根 熙(正會員) Journal of Electrical Engineer-
 ing and Information Science,
 vol. 1, no. 3, pp. 79-86,
 September, 1996 參照
 현재 한국전기연구소 전력전자연구
 부 전력변환팀장