

最近의 高出力 펄스에너지 發生裝置의 研究開發動向

文 在 德 中 谷 元
(慶北大 工大 教授) (日本三菱電機 研究員)

■ 차

레 ■

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 序論 2. 여러가지 펄스에너지 發生裝置 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 콘덴서를 에너지蓄積用 素子로서 사용한 것 2.2 코일을 에너지蓄積用 素子로서 사용한 것 2.3 磁氣壓縮方法을 이용한 것 3. 發電機를 이용한 펄스에너지 發生裝置 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 單極性發電機를 이용한 것 | <ol style="list-style-type: none"> 3.2 rail gun用 펄스에너지 發生裝置 4. 高出力 펄스에너지 發生裝置인 compulsator <ol style="list-style-type: none"> 4.1 compulsator의 動作原理 4.2 試作 compulsator의 構造와 性能 4.3 compulsator의 앞으로의 研究展望 5. 結論 參考文獻 |
|--|--|

1 序 論

펄스기술이라면 여러가지의 면에서 해설이 가능하나, 본 원고에서는 전기에너지를 時間的 및 空間的으로 壓縮하여 短時間內에 극히 높은 에너지密度를 吐出해내는 것에 관하여 主眼點을 두고서 해설하고자 한다. 이와 같은 펄스타위기술은 streamer chamber와 같은 原子核에 관한 연구, 磁氣壓縮과 같은 高密度磁場發生技術, LASER기술, 電子빔加

熱이나 플라즈마閉入用등의 核融合研究, 로켓트發射等の 軍事用 등의 각분야에 이르기까지 매우 폭넓게 利用可能하여 최근 各國에서 비밀리에 급속히 연구되고 있으며, 그 중에는 미국의 全電力에 해당하는 파워를 일순간(∼ns程度)에 吐出시킬 수 있는 것도 있다.

펄스적인 에너지를 供給하는 경우는 出力이 매우 크게되기 때문에 처음의 에너지를 축적하는 것과 또 축적된 에너지를 단시간에 급격히 吐出시키는 것이 필요하게 된다. 표 1은 주된 에너지蓄積方法

표 1. 에너지 蓄積方法에 따른 諸特性

에너지 蓄積 方法		에너지密度(MJ/m ³)	蓄積持續時間	펄 스 폭	가 격(W/J)
콘덴서 方式	펄스形成 線形形式	0.01~0.1	~ 1 μs	100ns以下	高
	高速콘덴서 "	0.1	~10min	100ns以上	高(400)
	低速콘덴서 "	0.3	~10min	10μs以上	高
코일 方式	常傳導코일形 "	10	~ 1 s	10μs以上	中
	超傳導코일形 "	10	~ 1 h	(100μs) 以上	中
機械的 方式	compulsator "	(10)		10μs~10ms	中
	單極發電機 "	20	~ 1 min	1 ms ~ 1 s	中
	短絡發電機 "	(20)	~ 1 min	~ 1 s	低
	交流發電機 "	50	~10min	~ 1 s	低(20)
化學的 方法	爆藥 "	5000	~10day	~10μs	極低(<10 ⁻²)
	電池 "	200	~ 1 day	~ 1 min	極低(<10 ⁻³)

과 그 성능, 가격등을 나타낸 것이다.^{3),4),15)} 이 중에서 現在 주로 많이 사용되고 있는 콘덴서축적형은 單位體積當 에너지密度가 낮고, 出力이 커짐에 따라 장치가 커지며 또 매우 가격이 비싸지는 단점이 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유에서 10MJ 以上の 큰 蓄積裝置로서는 코일蓄積形 또는 機械的 蓄積裝置를 사용하는 경우가 유리하게 된다.¹¹⁾⁻¹⁴⁾

本 解説에서는 표 1의 各 펄스發生方法의 裝置의 基本原理를 논하고, 특히 크게 연구되고 있는 機械的形式인 回轉裝置를 이용한 펄스발생장치에 대하여 설명하고자 한다.

2 여러가지 펄스에너지 發生裝置

2.1 콘덴서를 에너지蓄積用 素子로서 사용한 것

콘덴서를 에너지蓄積要素로 사용하는 것은 極短 펄스에서 긴 펄스폭의 펄스用까지 폭넓게 適用可能하고 더우기 效率面에서도 우수하며, 스위치도 수동으로부터 半導體素子를 사용할 수 있음은 물론 極短펄스用으로는 回轉方式等⁵⁾⁻⁷⁾을 사용할 수 있어서 汎用으로부터 精密研究用으로까지 넓게 쓰이고 있다.

콘덴서를 에너지蓄積素子로 사용한 펄스發生裝置의 基本回路圖를 그림 1에 나타내었다. 構成回路는 電源(直流 또는 半波의) 供給部, 充電抵抗(또는 코일)과 펄스形成콘덴서로 구성되는 펄스形成部, 펄스發生用 스위치와 負荷로 구성된다. 이때 負荷쪽에서 出力으로 利用할 수 있는 電力은 식 (1)과 같으며, 여기서 f_p 는 出力펄스의 주파수이다.

$$W = f_p CV^2 / 2 \quad (1)$$

그리고 특히 超高電壓極短펄스파워(數10ns, MV, MA pulse)를 발생시키는 경우에는 콘덴서의 코일 성분을 크게 줄이거나, 콘덴서代用으로 線形펄스形成裝置(pulse forming line)을 사용하거나 Blumlein line을 사용하기도 한다.^{2),4),9)} 그리고 펄스발생용 스위치로서는 간단하면서도 高電壓의 極短펄스까지 쉽게 얻을 수 있는 固定 또는 轉回 放電球間隔(ball

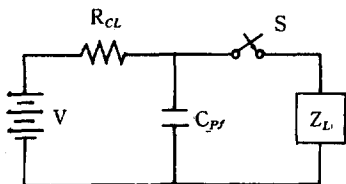


그림 1. 콘덴서를 에너지 蓄積素子로 使用한 펄스發生回路

type spark-gap)이 많이 사용되며, 그의 低電壓의 펄스用으로는 thyristor, thyratron, ignitron 등이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 스위치素子로서 요구되는 특성으로서는 高耐電壓, 極高速 및 高反復의 長壽命이 요구되고 있으므로 이 分野의 연구도 크게 수행되고 있으며, 현재 주로 研究開發用으로 사용되고 있는 것으로는 放電球를 이용하는 장치들과 水素封入 thyratron을 利用하는 裝置들이 많이 이용되고 있다.^{10),11)} 또 콘덴서自體도 수많은 反復的 充放電을 계속하므로 말미암은 壽命問題도 앞으로 해결해야 할 한 문제가 되어있다.¹²⁾

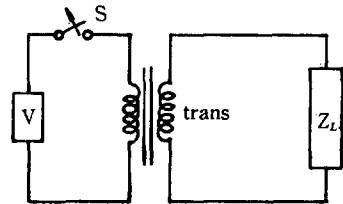
2.2 코일을 에너지蓄積用 素子로서 사용한 것

코일을 에너지蓄積要素로 사용하는 장치의 基本回路圖를 그림 2에 나타내었다. 이와 같은 장치는 먼저 인덕턴스 L에 강력한 전류를 흘려서 磁氣 에너지 ($E_m = Li^2/2$)를 蓄積시켜 놓은 후에 스위치 S를 순간적으로 끊어서 전류를 遮斷함으로써 負荷의 양단에 起電力 e를 식 (2)와 같이 발생시킬 수 있게 된다.

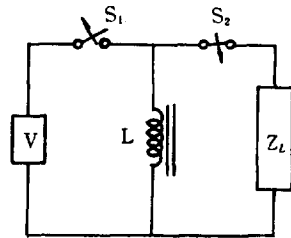
$$e = -L di/dt \quad (2)$$

코일을 이용한 磁氣에너지蓄積形은 비교적 간단하고 큰 에너지密度를 얻을 수 있어서 高出力펄스用에 적합하다.

이 코일形式의 가장 중요하면서 어려운 技術的 要素는 전류를 적절히 遮斷할 수 있는 스위치部分



(a) transformer type



(b) direct type

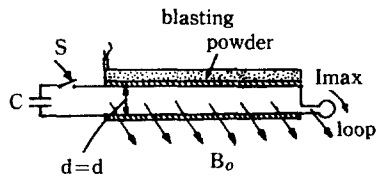
그림 2. 코일을 에너지 蓄積素子로 使用한 펄스發生回路

으로, 순간적으로 증발하는 금속을 이용한 퓨즈형, 爆藥形, 急速斷機械스위치, 半導體스위칭素子 등이 사용된다. 急速斷機械스위치나 半導體 등의 固體스위치의 경우에는 周期的反復스위치로서 사용가능하나 펄스立上時間이 어느정도(μs 정도) 이상의 빠른 펄스의 발생이 不可하며, 電流容量이 커짐에 따라서도 문제가 된다. 또 負荷가 인덕턴스性으로 그 값이 電源側의 인덕턴스와 같아지면 처음의 축적에너지의 半程度가 스위치部에서 放電으로 사라져 소모되어 버리며, 또 이것을 피하기위하여 전원의 인덕턴스와 병렬로 콘덴서를 넣는 方法이 있으나 이 방법도 高電壓大容量의 콘덴서를 써야하는 問題點을 갖게된다.¹⁾

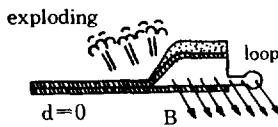
근년에 이르러 超傳導技術의 進展으로 이 분야에서 常傳導코일대신에 超傳導코일이 유리하다. 즉 상전도코일을 사용하는 경우 蓄積時間이 짧기때문에 勵起電源이 大容量으로 될 수 밖에 없게되나, 초전도코일을 사용하는 경우 에너지保持時間이 길기때문에 비교적 작은 勵起電源으로도 大容量의 에너지를 蓄積可能하게 된다. 그러나 급격한 電流變化를 超傳導코일에 주지않게 하기위하여 축적에너지의 吐出時間을 극히 짧게함에 문제가 있으나 대개 축적에너지가 1MJ정도로 작은 경우에는 100 μs 이상이며, 1GJ정도로 클때는 10⁻²~1s정도로 커지게 된다.⁸⁾

2.3 磁氣壓縮方法을 이용한 것

火藥을 이용한 磁氣壓縮方法의 펄스發生裝置의



(a) before exploding



(b) after exploding

그림 3. 火藥爆發을 利用한 磁場壓蓄形 펄스 發生 裝置

壓縮部의 回路圖와 原理는 그림 3과 같다. 즉 回路는 電流供給用콘덴서와 두장의 平行平板電極(이것중 上部平板에는 폭발용 화약이 부착되어 있음), 高磁場發生用 環狀電極 및 스위치로 構成된다. 먼저 스위치를 닫아서 콘덴서의 充電電壓을 급격히 環狀電極으로 흘려서 이 전류가 최대가 되기 직전에 上部平板電極上의 火藥에 點火시킨다. 그러면 點火와 동시에 上下의 平板電極이 左端쪽부터 폭발에 의해 壓着되어 들어가게 되어 初期磁束 Φ_0 가 平板電極과 環狀電極으로 구성되는 閉回路안에 갇혀있다가 폭발에 의한 平板電極의 壓着에 의해 우측으로 밀려져서 마침내 環狀電極中에 閉入되어 이때 最大磁場이 얻어지게 된다. 즉 閉回路가 둘러싸는 面積과 磁束을 각각 S_0 및 Φ_0 , 環狀電極의 面積과 磁束을 각각 S 와 Φ 라 하면 磁束密度 B 와 初期磁束密度 B_0 의 비는 식 (3)으로 나타내어지며, 만일 이 爆發과 정중 磁束의 손실이 없다면 즉 $\Phi_0 = \Phi$ 라면 磁氣場에 의한 에너지 E_m 는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$B/B_0 = \Phi S_0 / \Phi_0 S \tag{3}$$

$$E_m = S_0 E_0 / S \tag{4}$$

따라서 壓縮된 面積만큼 에너지는 增大됨을 알 수 있다.

현재 이상과 같은 기술로서 낼 수 있는 最大磁束密度는 310Tesla정도로서 이때의 環狀電極의 직경은 2.1mm, 콘덴서의 充電에너지는 25KJ정도이다.¹⁵⁾

3 發電機를 이용한 펄스에너지 發生裝置^{12) - 24)}

3.1 單極發電機를 이용한 것

單極發電機는 그림 4에서와 같이 一定磁界中 回轉子가 회전하고, 이 回轉子上의 導體가 磁束을 끊음으로 直流起電力을 발생시키며, 出力은 數十V 및 5,000~150,000A정도이다. 그러나 大電流用으로 사용될때는 集電部인 부라쉬部에 接觸抵抗과 摩擦에 의한 큰 損失이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 부

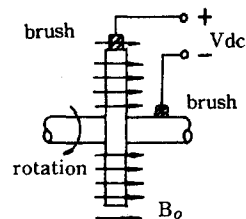


그림 4. 單極發電機의 構成圖

라쉬대신에 常溫에서도 液體狀態이며 또 粘性도 적은 금속인 NaK등을 사용하는 기술이 발달되어 최근에는 매우 효율이 높은 장치도 개발되고 있다.

이 單極發電機를 펄스발생용으로 사용하는 경우 電氣回路的으로는 靜電容量C의 콘덴서等價로 볼 수 있으며 인덕턴스분은 無視可能하게 된다. 이때 回轉子의 회전에너지를 E, 出力端子電壓을 V라 하면 C값은 식 (5)와 같이 나타내어진다.

$$C = 2E/V^2 \quad (5)$$

이 C값은 回轉子의 크기와 속도에 따라 변하지만 대개 數KF정도의 큰 값을 얻을 수 있다.¹³⁾ 單極發電機로부터 펄스전류를 공급하는 경우 펄스폭은 C와 負荷回路的 回路定數에 의해 결정되며, E=5MJ인 경우의 펄스전류 j와 角速度 ω의 時間依存性의 한예를 그림 5에 나타내었다.²⁴⁾ 또 표 2에 서로 틀리는 3種類의 單極發電機와 그것에 의해 얻어진 전류펄스파라미트의 관계를 나타내었다. 표 2에 의하면 蓄積에너지가 클 수록 펄스폭이 길어짐을 볼 수 있다.¹³⁾ 그러나 單極發電機는 蓄積에너지가 10-100MJ정도이므로 單機로서는 秒程度의 전류펄스밖에 얻어지지 못하게 된다. 따라서 더 짧은, 강력한 펄스를 얻기 위해서는 다른 고속의 에너지蓄積源과 결합할 필요가 있다.³⁾ 그러나 中程度의 에너지蓄積要素로서 인덕턴스를 사용하면 單發電機로서도 상당히 큰 위력을 발휘할 수도 있다. 이와 같은 장치로서는 rail gun用이 있는데 이 장치는 최

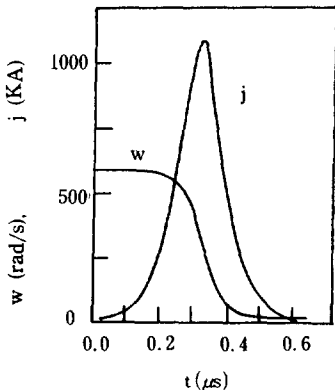


그림 5. 펄스電流와 角速度, 時間依存性

표 2. 3種類의 單極發電機의 펄스특성

項目	蓄積에너지	펄스 폭	펄스立上時間	비고
A型	500MJ	1S以上	600ms	
B型	5MJ	700ms	50ms	
C型	0.365MJ	5ms	0.4ms	

신기술로서 이 장치에 대하여 설명하고자 한다.

3.2 rail gun用 펄스發生裝置¹⁶⁾⁻²¹⁾

rail gun이라는 것은 그림 6에서 보듯이 2개의 平行平板電極間에 發射體를 끼우고 이것에 그림과 같이 大電流를 흘림으로서 發射體의 전후에 생긴 磁氣壓의 差로써 發射體를 加速發射하는 장치이다. 이 rail gun을 최초로 동작시킨 사람은 1970년 초의 오스트레일리아의 R. Marshall 그룹으로서 그림7과 같은 장치이었다.

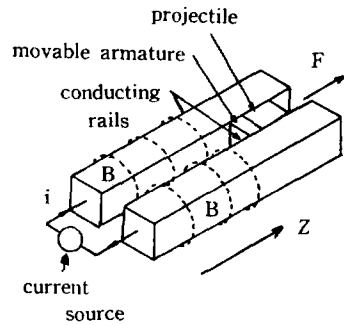
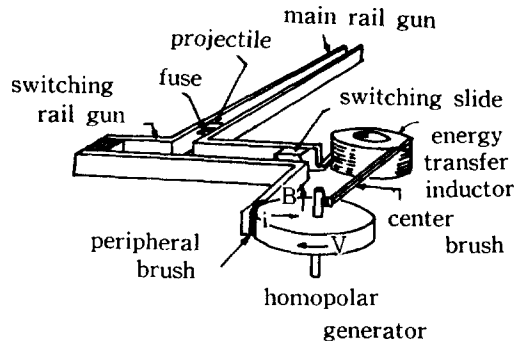
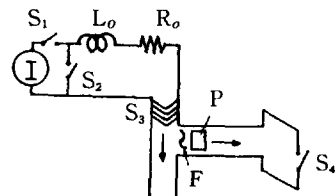


그림 6. rail gun의 構成 및 原理圖



(a) component daigram of a rail gun system



(b) equivalent circuit of a rail gun system

그림 7. 제안된 rail gun 實際裝置와 等價回路圖

rail gun의 電流源은 蓄積에너지가 500MJ 정도의 單極發電機로서 數m정도의 짧은 rail길이에서 1ms 정도의 短時間內에 가속해야 하기때문에 單極發電機로부터의 전류를 일단 空心코일 L_o ($E_{storage}=2.75$ MJ, $I_{max}=500$ kA, $L_o=22\mu H$, 所要時間0.5s)에 蓄積한다. 즉 그림 7의 S_1 를 열면서 S_2 를 닫아서 S_3 로 형성된 回路로부터 S_3 를 이동시켜서 發射體P에 大電流를 공급시킨다. 따라서 發射體는 가속되어서 약 2ms後에 rail gun의 先端으로부터 發射되나, 이때 rail先端에서 아-크放電이 일어나므로 S_4 를 닫아서 아-크放電을 제거한다. 여기서 S_3 는 rail gun과 같은 원리로서 작동하는 것으로 두개의 帶狀電極間을 이동해서 大電流를 흘려주는 역할을 할뿐 아니라, L_o 의 充電期間中에는 發射體가 大電流에의해 高溫으로 加熱되는 것을 막아주는 역할도 한다. 이때의 發射體의 位置, 速度, 電流의 時間依存性을 나타낸 것이 그림 8이다. 이처럼 큰 電流容量을 가지고 있으면서도 高速動作이 되지않는 單極發電機와 L_o 와 같은 에너지蓄積用 코일을 결합함으로써 비교적 빠른 大電流펄스(ms程度)를 발생시킬 수 있게 된 것이다.

화학이 폭발할때의 壓力을 이용해서 物體를 가속하는 권총과 같은 화학총의 경우 얻어지는 最大速度가 약2km/s인 것에 비해 rail gun은 磁氣壓을 사용하기 때문에 理論的으로는 빛의 속도까지 加速可能하다고 할 수 있다. 또 로켓트의 경우 발사에 필요로하는 燃料부분의 무게가 대부분(약99%)은 차지함을 감안 할때 rail gun과 같은 작은 장치로서 발사할 수 있다면 획기적인 기술혁신이라고 할 수 있겠다. 그러나 현재의 기술로는 發射體質量이 2g의 경우 地球重力圈으로부터의 脫出速度에 해당하

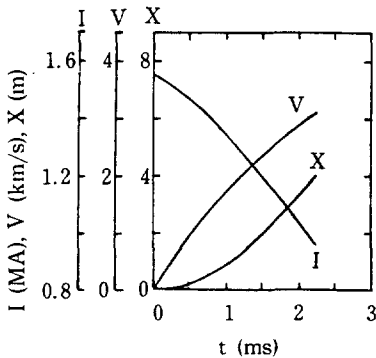


그림 8. 發射體의 位置, 速度 및 rail 電流의 時間依存性

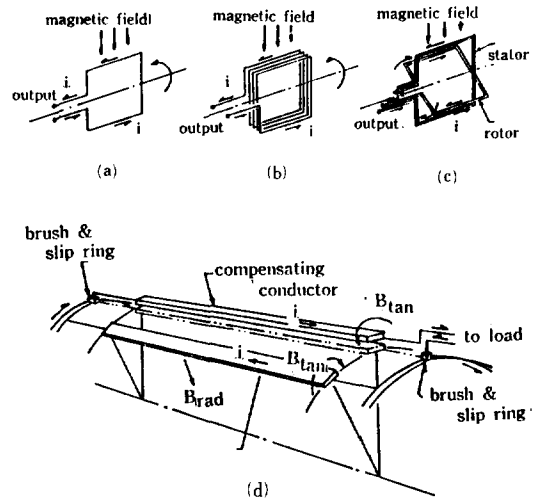
는 11km/s까지 가속시킬 수 있으며, 300g의 경우 3km/s까지가 가능한 상태이다. 따라서 이 기술은 새로운 분야로서 앞으로 큰 進進과 성과가 기대된다.

4 高出力 펄스에너지發生裝置인 Compulsator^{13), 14)}

4.1 Compulsator의 動作原理

그림 9 (a)는 통상의 교류발전기로서 출력을 높이기 위해서는 (1)磁束密度를 높이면 (2)回轉速度를 올리면 (3)卷線數를 증가할 필요가 있게되나, 材料에 의해 (1)과 (2)는 上限線이 결정되기때문에 그림 9 (b)처럼 卷線數N을 增線시킬 수밖에 없게 된다. 그런데 出力電壓은 N에 비례하지만 内部 인덕턴스는 N^2 에 비례하기 때문에 出力펄스의 立上時間을 빠르게 할 수 없기때문에 결과적으로는 出力電壓도 높일 수가 없게된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 美國의 Texas大學의 W. F. Weldon等은 Compulsator (compensated pulsed alternator)라고 불리는 장치를 개발하여 현재 核融合用 電源裝置로서 研究開發에 몰두하고 있다.^{13), 14)}

이 compulsator의 원리를 그림 9 (c)에 나타내었다. 통상의 交流發電機의 磁極의 바로 밑에 回轉子



(a) ac generator, general
(b) ac generator, powerful
(c) principle of the compulsator
(d) proposed compulsator

그림 9. 交流發電機와 compulsator의 原理및 제안된 裝置構造圖

의 電機子코일과 同形의 補償코일을 설치한다. 이 코일은 靜止코일로서 slip ring을 사이에 두고 回轉子의 電機子코일과 直列로 接續하면 電機子電流가 兩方向의 코일을 통하여 흘러서 그림 9 (b)의 B_{tan} 과 같은 磁束을 만들고 이 磁束이 兩코일사이에 捕捉되게 된다. 이 磁束은 兩코일이 重疊될때 즉 인덕턴스가 최소가 될때 壓縮되어 이 壓縮된 磁束이 外部로 大電流펄스로서 放出되게 된다. 이것은 앞의 2·3절에서와 같이 磁束壓縮에 따라 機械的에너지가 磁氣에너지로 變化되어 인덕턴스가 작아졌을때 이 蓄積된 磁氣에너지가 外部로 大電流펄스로서 吐出되기 때문이다.

Compulsator의 等價回로는 그림10과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 $e(t)$ 는 電機子코일이 界磁卷線에 의해 만들어진 磁束을 끊을때 생기는 起電力으로 磁束壓縮效果에 의해 變歪를 받아서 펄스狀의 出力電壓波形 $v(t)$ 로 變換되어 그림11과 같이 나타나 지며, 또 $R_{in} \ll R_L$ 의 조건이 만족되면 식 (7)과 같이 나타내어 진다.

$$\int_0^T v(t) dt = \int_0^T e(t) dt \quad (7)$$

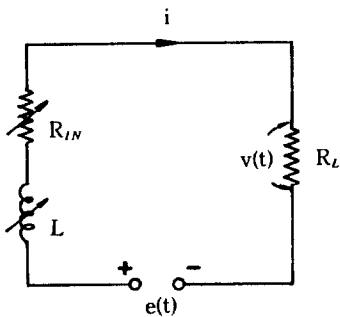


그림10. compulsator의 等價回路圖

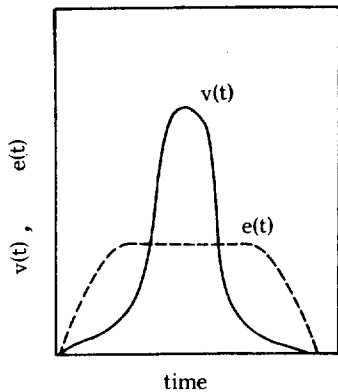


그림11. 펄스出力電壓 및 電源電壓의 時間依存性

이때 回轉子의 회전에 따라 L의 變化分이 클 수록 出力電壓波形은 變歪하게 되며 결과적으로 出力電壓波의 피크값도 높아지게 된다. 이때의 인덕턴스의 時間依存性을 그림12에 나타냈으며, 이 경우 인덕턴스의 變化分은 대개 $L_{max}/L_{min} \approx 20$ 程度이다.

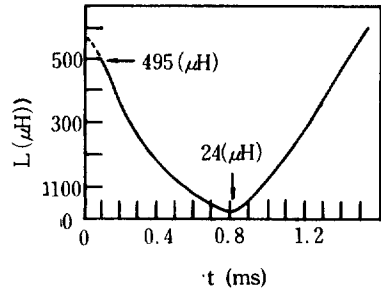


그림12. 인덕턴스의 時間依存性

4·2 試作 Compulsator의 구조와 성능

美國의 Lawrence Livermore 연구소와 Teaxs 대학이 協同하여 試作한 小型 compulsator 장치를 그림13에 나타내었다. 磁極은 4極으로 構成되고, 回轉子의 크기는 直徑38cm, 길이 120cm정도이며, 回轉速度는 4840rpm이다. 그림14는 以上の 장치를 Laser의 勵起用brush lamp를 負荷로 했을때의 電壓 및 電流特性으로, 初期電壓이 負로 나타나는 것은 始動用콘덴서(10kJ)가 brush lamp와 직렬로 연결되어 있기때문이며, 이 경우 펄스反復時間이 6.2ms인 것에 비해 波頭長 約1ms의 電流펄스가 얻어

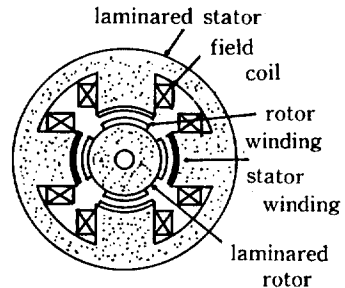


그림13. compulsator의 斷面圖

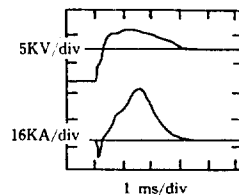


그림14. 製안된 compulsator의 電流 및 電壓特性

점을 알 수 있다.

參 考 文 獻

4-3 Compulsator의 앞으로의 研究展望

Compulsator는 펄스를 발생함에 있어서 가장 큰 문제점의 하나인 스위치가 필요하지 않으며, 또 反復的이고 周期的인 펄스를 발생시킬 수 있으며, 또 기계적회전에너지를 이용하기때문에 小型高能力의 펄스발생장치로서 크게 각광을 받게 되었다. 따라서 이 장치가 提案된지 아직 10년정도로써 현재 각국에서 다투어 研究中에 있으며, 앞으로 出力펄스 폭이 10 μ s~10ms정도, 펄스反復周波數가 10KHz정도까지, 出力펄스의 피이크電力은 10GW 以上の 小型裝置의 實現可能은 충분히 있다고 사료되어지고 있다.

本 compulsator의 應用分野는 앞으로도 多方面에 적용되리라고 생각되나, 특히 미국의 Lawrence Livermore 국립연구소의 核融合用 大型 Nd gas Laser用 勵起電源으로서 150MJ정도의 콘덴서뱅크(condenser bank, 必要床面積은 약5000m²)대신에 이 compulsator를 이용함으로써 약1/10정도의 面積으로도 가능하게 되었으며, 콘덴서뱅크로서는 불가능한 反復펄스(10pulses/s)의 發生도 가능하게 됨으로 앞으로 本 compulsator는 大型 Laser用 勵起電源으로서도 매우 각광을 받을 것으로 사료된다. 이 밖에도 核融合用 中性子빔發生裝置의 電源 또는 電子빔발생장치용의 전원(특히 軍事用으로도 注目됨), 進술한 發射用 rail gun用, 一般研究 및 工業用等 앞으로 많은 분야에 적용되리라고 사료된다.

5 結 論

보통의 小型의 펄스發生裝置로서는 일반적으로 콘덴서를 에너지축적소로서 사용함이 간단하나, 出力이 10MJ 以上の 大型이 되면 콘덴서로서는 축적에너지밀도가 낮고 占有體積도 커지며, 高價로 되는 단점이 크게 대두하게 된다.

이와 같은 경우에는 코일을 에너지축적소로서 사용하는 방법과, 單極發電機와 空心코일을 결합한 펄스發生電源, 또 compulsator를 사용한 전원을 이용함이 小型 및 저렴해지리라고 사료된다. 특히 compulsator는 그 기술이 개발된지도 십여년으로 얼마 되지 않으며, 금후 가장 중요하고 각광받는 高出力 펄스에너지發生裝置로서의 위치가 굳어지리라고 사료되므로 이 분야에 젊은 학자들의 많은 참여와 큰 노력을 기대해 본다.

- 1) 北川史郎, プラズマ核融合 伏見編 共立 出版社 (1979) p. 135
- 2) 中井眞雄 外, 昭和54年電氣學會 全國大會 シンポジウム S 1-4
- 3) 木山 學 外, ibid S 1-5
- 4) 中井眞雄 外, 昭和56年電氣四學會連合大會 2-1
- 5) 文 在德 外, 極短펄스電圧을 이용한 強力오존 發生裝置開發에 관한 研究, (to be presented)
- 6) S. Masuda et al., Record of IEEE/IAS 1984 Annual Conf. (Oct. 1984)
- 7) J. Salge et al, Proc. 5th Int'l symp. on Plasma Chemistry (Aug. 1981)
- 8) 大西利只, 昭和56年電氣四學會連合大會, 2-1
- 9) 須田英博 外, 日本物理學會誌, 25 (1970) 701
- 10) IEEE trans. Electron Device, vol. 26, (1979) 14 01-1536
- 11) IEEE trans, Plasma Science, vol. 8, (1980) 130 -225
- 12) W. J. Sarjeant, "Capacitors" Presented at pulse power for plasma physics minicourse- fundamentals for pulse power technology, Santa Fe (May 1981)
- 13) W. F. Weldon, "Rotating sources- homopolar and compulsator" ibid
- 14) R. J. Foley and W. F. Weldon, Compensated pulsed alternator-a new concept for generating high powered pulsed energy, Brochure, Lawrence Livermore Lab., Livermore, California. (Oct. 1980)
- 15) F. Herlach, Proc. 2nd Int'l Conf on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Washington D. C. (May 29-June 1, 1979) p. 1
- 16) J. P. Barber, R. A. Marshall et al, ibid p. 287
- 17) R. S. Hawke et al, ibid p. 297
- 18) H. Kolm et al. IEEE Spectrum (April 1982) p. 30
- 19) H. D. Fair, IEEE Trans. on Mag. vol. 18 (1982) p. 4
- 20) D. W. Deis et al, ibid (1982) p. 16
- 21) F. J. Young et al, ibid (1982) p. 29
- 22) J. H. Gully, ibid (1982) p. 160
- 23) W. F. Weldon et al, ibid (1982) p. 165
- 24) R. Hahn et al ; Rev. phys, Appl. 8 (1973) p. 53