

10kV 20kA급 펄스파워용 RSD Stack 시스템 개발

정 인화, 김 중수, 임 근희
한국전기연구원

Development of 10kV 20kA RSD Stack System for Pulsed Power Generation

In-Wha Jeong, Jong-Soo Kim, Geun-Hie Rim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 펄스파워 응용기술에 있어서 핵심이 되는 것은 대전력 고반복율의 스위칭 특성을 갖는 스위치 및 구동기술이다. 지금까지 대전력 에너지를 전달하기 위해 사용되고 있는 스위치는 크게 사이리트론 등과 같은 진공 스위치와 자기 스위치, 그리고 반도체 스위치로 구분할 수 있는데 이 중에서 기존 반도체 스위치들의 한계를 극복하고 낮은 제작비용으로 대전력 고반복용 펄스 전원 장치 등의 다양한 산업분야에 활용하고자 개발된 반도체 스위치가 바로 RSD (Reverse Switch-on Dynistor)이다. RSD는 애벌런치 전류에 의해 소자 전체를 동시에 턴온시키는 특성이 있으므로 고전압 적용을 위해서 직렬 스택을 구성하는 경우에도 턴온 지연이 거의 없어서 전압 분배기와 같은 추가적인 장치가 필요 없으며 높은 di/dt 특성과 우수한 펄스 통전능력을 가진다. 본 논문에서는 30μs의 펄스폭으로 스위칭 할 수 있는 10kV 20kA급 펄스파워용 RSD 스택 시스템의 설계와 실험결과를 보여 주고 있다.

1. 서 론

현재 주목받고 있는 대전력 펄스발생기를 구현하기 위해서는 무엇보다도 높은 에너지를 고속으로 반복 스위칭 할 수 있는 스위치의 개발이 필요하다. 일반적으로 대전력 고속 스위칭은 가스방전 등을 이용한 진공 스위치를 사용하여 이루어졌으나 이런 종류의 스위치들은 턴온 동작의 불안정성, 전극의 열화로 인한 짧은 수명 등과 같은 치명적인 결점을 가지고 있다.

최근 재료분야와 패키지 제작기술의 급속한 발전에 힘입어 적용영역을 넓히고 있는 전력용 반도체 스위치의 적용 가능성을 살펴보면, 사이리스터 등과 같은 대용량 스위치의 경우에는 통상적으로 분산 게이트 구조를 가지고 있으므로 턴온 동작이 국부적으로 발생하여 소자 전체로 확산되는 시간이 필요하고 특히 이런 턴온 지연에 따른 문제는 대전력 스위칭을 하기 위해 직렬 스택 구조를 구성할 때 심각하며 이를 해결하기 위해서 스택 내부의 소자들에 균등한 전압을 분담해주는 전압분배기와 같은 추가적인 부분이 필요하게 된다.^[1] 또한, IGBT의 경우에는 고속 스위칭 특성과 증용량 정도의 스위칭 능력을 겸비하고 있지만 내전압, 통전용량 측면에서 대전력 펄스파워 시스템에 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 측면을 보완하기 개발되고 있는 SI 사이리스터와 IGCT는 사이리스터의 대용량 스위칭 능력에 고속 스위칭 기능을 추가한 소자로서 di/dt 내량이 높기 때문에 대전력 고반복용 응용분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.^{[2],[3]}

본 논문에서 살펴보고자 하는 RSD (Reverse Switch-on Dynistor) 또한 전력용 반도체 스위치들이 갖고 있는 여러 한계점들을 해결하여 대전력 고반복용 펄스전원장치와 같은 다양한 산업분야에 활용하고자 1980년대 중반부터 러시아에서 개발되고 있는 소자로서 가장 큰 특징으로는 스위칭 할 수 있는 전류용량이 매우

크면서 턴온 지연과 손실은 아주 작다는 점이다. 이와 함께 RSD 소자는 기존 ABB사 등에서 판매되고 있는 고전압 대전력용 사이리스터에 비해 가격이 30% 정도밖에 되지 않기 때문에 현재 많은 국가에서 주목을 받고 있으며 독일, 미국, 중국, 네덜란드 등에서는 RSD 소자를 적용하여 다양한 종류의 고전압 대전력 펄스파워 시스템을 구현하고 있는 실정이다.^[4]

본 논문에서는 최대 정격전압 2.3kV, 웨이퍼 지름 80mm인 RSD 소자 6개를 직렬로 스택을 구성하여 30μs의 펄스폭으로 스위칭 할 수 있는 10kV 20kA급 펄스파워 시스템을 구현하고 다양한 실험을 통해 그 특성을 검토해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 RSD 동작원리

일반적으로 반도체 소자를 사용한 대전력 스위칭은 높은 초기저항 상태에서 도통영역의 전도도가 급격히 증가해야 한다는 조건과 소자에 인가되는 외부전압에 견딜 수 있어야 한다는 조건이 만족할 때 비로소 안정되게 이루어질 수 있다. 또한 공간전하 영역의 전도도는 높은 전도도를 가진 전자와 홀 플라즈마로 가득 채워짐에 따라 급격히 증가하는데 이때 최대 소위칭될 수 있는 전류량은 주입된 플라즈마 밀도에 의해서 결정된다.

RSD 구현에 적용된 플라즈마 제어층을 이용한 스위칭의 개념도 이와 동일하며 일반적으로 3단자 사이리스터와 다른 점은 게이트 전극을 없애고 이를 균일하게 펼쳐진 플라즈마 층으로 대체하여 스위칭이 소자 전체에 걸쳐 균일하고 동시에 발생한다는 것이다. 그러나 플라즈마 제어층을 만드는 것은 생각만큼 쉽지 않으며 다행스럽게도 역주입 제어 기술이 가장 손쉽고 강력한 장점을 갖고 있음이 밝혀졌다. RSD에서도 적용하고 있는 이 기술은 소자에 인가되는 전압극성을 짧은 시간동안 바꿈으로써 플라즈마 제어층이 발생할 수 있다는 사실에 기초를 두고 있다.

RSD는 사이리스터와 트랜지스터가 교대로 집적된 구조를 가지고 있는 새로운 개념의 턴온 특성을 보여주는 대용량 전력용 소자이다. 그림 1은 RSD의 기본적인 내부 구조를 보여주고 있다. RSD는 턴온 동작을 위해 애노드와 캐소드 사이에 순간적으로 역전압을 인가함으로써 트랜지스터부의 베이스-에미터 (N⁺P) 접합을 애벌런치 파괴시키고 이때 흐르는 펌핑 전류에 의해 N-베이스에 전자를 주입시켜 소자 전체를 동시에 도통시키는 특징이 있다. 이런 특징 때문에 고전압 시스템 적용을 위해 직렬 스택을 구성할 때, 각 소자간의 턴온 지연이 매우 작게 되어 전압분배기와 같은 추가적인 장치가 필요 없으며 무엇보다도 스위칭 손실을 낮추는 동시에 펄스 통전용량을 크게 증가시킬 수 있다. 이와 같은 점에서 RSD는 대전력 펄스전원용 반도체 스위치로서 큰 장점을 갖고 있으며 고전압 대전력용 스택을 구성할 때에도

간단한 구조와 낮은 제작, 유지비용으로 전체 시스템을 효과적으로 구현하도록 도와준다. 현재까지 최대 정격전압 2.3kV, 유효면적 50cm²(웨이퍼 지름 80mm)인 RSD 소자가 개발되어 직렬 스택구조를 통해 최대전압 50kV의 고전압 시스템에도 성공적으로 적용되었다.

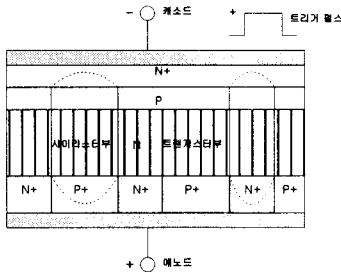


그림 1. RSD의 내부구조 단면도

2.2 펄스파워용 RSD Stack 시스템

그림 2는 펄스파워용 RSD 스택 시스템의 기본 구성을 보여주고 있다. 전체 시스템의 동작을 살펴보면, 먼저 외부의 고전압 캐패시터 충전기를 통해 부하에 전달될 에너지와 RSD 스택의 트리거를 위한 펌핑 에너지가 각각 파워 캐패시터 C_k와 펌핑 캐패시터 C_o에 최대 10kV 까지 충전이 되고 이후 트리거 신호와 함께 펌핑 캐패시터 C_o가 RSD의 역방향으로 짧은 시간동안 방전되면서 최대 1kA, 1μs 펄스폭을 갖는 펌핑 전류를 공급하게 된다. 이 펌핑 전류에 의해 RSD 내부에는 소자 전체에서 균일한 도통이 이루어지기 위한 플라즈마 제어층이 형성되는데 일반적으로 RSD를 안정적으로 트리거 시키기 위한 펌핑 전류의 크기는 소자의 유효면적과 도통되는 펄스전류의 di/dt 크기에 비례한다. 또한, 펌핑 전류가 충분하지 못한 경우에는 스위칭 시점에 RSD 스택에서 발생하는 과도전압의 크기가 급격히 상승하게 되므로 스위칭 손실이 증가할 뿐만 아니라 RSD 소자의 안정성 측면에서도 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 이 때문에 시스템의 보호 회로에서는 파워 캐패시터에 병렬로 연결된 고전압 분배기를 통해서 충전 전압 상태를 확인하여 5kV이하인 경우는 RSD 스택이 트리거 되지 못하도록 하고 있다.

한편, RSD 스택의 트리거를 위한 펌핑 전류가 공급되는 동안 파워 캐패시터와 부하로 이루어진 주회로는 포화 쇼크에 의해 트리거 회로와 전기적으로 분리된 상태로 있게 된다. 특히, RSD 스택을 트리거 시키기 위해 역전압이 가해지는 시간 동안에 포화 쇼크가 포화되지 않고 펌핑 과정이 안정되게 이루어질 수 있도록 포화시간을 정확하게 설계하여야 하며 본 시스템에서는 트리거 신호 입력후 3μs 이후에 포화되도록 하였다.

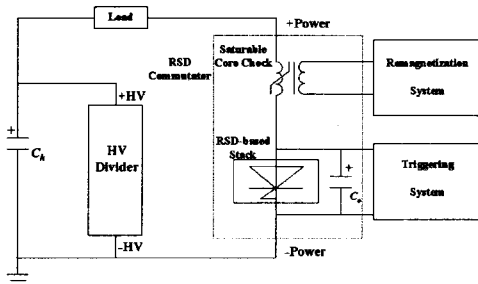


그림 2. RSD 스택 시스템 구성

대전력 스위칭을 위한 펌핑 과정 동안에 주회로와 트리거 회로를 분리시켜 주었던 포화 쇼크가 짧은 시간에 포화된 후, 비로소 파워 캐패시터 C_k와 부하를 통해 주전원이 RSD 스택에 인가되고 이전 펌핑 과정을 통해 플라즈마 제어층이 형성되어 있는 RSD 스택은 동시에 순방향으로 도통되며 부하에 대전력 펄스전류를 공급하게 된다. 이후 반복 스위칭 동작을 위해 파워 캐패시터와 펌핑 캐패시터는 다시 외부의 고전압 캐패시터 충전기에 의해서 빠르게 충전되고 이와 동시에 포화 쇼크는 역자화 회로에 의해 초기 상태로 변환된다.

2.3 RSD Stack 시스템의 제어 및 보호회로

그림 3은 대전력 고반복용 펄스 전원장치로서 개발된 RSD 스택 시스템과 구동장치의 결선도를 보여주고 있다. 전체 시스템 구성을 살펴보면 부하에 전달되는 10kV 20kA급 펄스파워 용량에 맞도록 설계된 RSD 스택과 이를 최적으로 스위칭하기 위한 트리거 장치 및 제어 장치, 그리고 펌핑 과정 동안 주회로와 트리거 회로를 전기적으로 분리해주는 포화 쇼크와 부하에 전달될 출력 에너지를 파워 캐패시터에 공급해주는 고전압 캐패시터 충전기 등으로 구성되어 있다. 이중에서 전체 RSD 스택 시스템의 동작을 제어하고 시스템 상태를 확인하는 역할을 수행하는 제어 장치는 모든 입출력 신호를 처리하는 중요한 부분이다. 먼저, 외부 고전압 캐패시터 충전기를 통해 입력된 충전완료 신호를 받아들여 이를 트리거 장치의 구동신호로 전달하게 된다. 이때 고전압 분배기를 통해 충전 전압을 확인하여 최소 펌핑 전류 350A를 공급하기에 충분하지 못한 5kV이하의 충전인 경우와 RSD 스택의 최대 정격전압에 근접한 10.5kV이상의 충전인 경우에는 RSD 스택 시스템의 보호를 위해서 각각 저전압, 고전압 보호회로를 통해 트리거 신호를 차단하게 된다. 또한, 동작 중에도 RSD 스택의 온도상승과 냉각상태를 감시하여 이상이 있을 경우에는 전체 시스템을 정지시킨 후 이상 상태를 표시하도록 하였다.

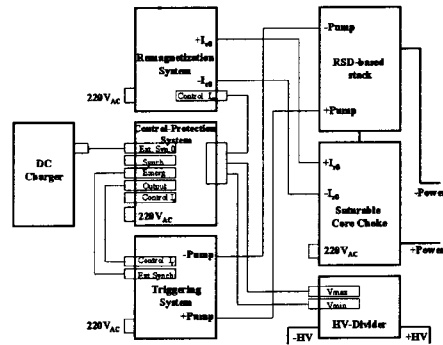


그림 3. RSD 스택 시스템 결선도

2.4 RSD Stack 시스템 설계 및 제작

그림 4-6은 제작된 10kV 20kA급 RSD 스택 시스템과 구동장치를 보여주고 있다. 본 연구에서 개발된 RSD 스택은 소자의 지름이 80mm, 두께가 2mm이며 최대 정격전압이 2.3kV인 RSD 소자 6개가 직렬로 연결된 구조를 갖고 있다. 또한, 펌핑 과정 동안 주회로와 트리거 회로를 분리시켜 주는 포화 쇼크는 3μs의 포화 시간을 갖도록 하기 위해서 매우 작은 2μH의 인덕턴스 값으로 설계되었고 대전력 반복 스위칭 회로에 적합하도록 손실이 작고 역자화 특성이 빠른 강자성체 코어를 사용하여 제작되었으며 팬에 의한 강제냉각 방식을 채택하였다.

RSD 스택의 구동특성을 결정짓는 트리거 회로를 구현하기 위해서는 1kA, 1μs 펄스폭을 갖는 펌핑 전류를 원활하게 공급할 수 있도록 트리거 장치 내부의 스위치 또한 지름이 24mm이고 최대 정격전압이 2.3kV인 RSD

소자 6개를 직렬로 연결하여 구성하였고 RSD 스택에 병렬로 연결되는 펌핑 캐패시터는 0.044 μ F의 용량을 갖는 고전압 캐패시터가 사용되었다. 펄스전류의 형태로 부하에 전달되는 에너지를 공급하는 파워 캐패시터는 32 μ F 40kV의 정격을 가지는 GENERAL ATOMICS사의 고전압 고에너지 저장용 캐패시터가 선정되었으며 최대 20kV 전압까지 2A의 정전류로 충전할 수 있는 고전압 캐패시터 충전기를 사용하여 파워 캐패시터를 충전시켰다. 이때 소요되는 충전시간과 구동 가능한 최대 반복율은 다음과 같다.

$$T_C = \frac{C_K V_C}{I_C} \quad (1)$$

$$\text{Repetitionrate} = \frac{1}{T_C} \quad (2)$$

식 (1)에 파워 캐패시터스 32 μ F와 최대 충전 전압 10kV, 충전 전류 2A를 대입하면, 소요되는 충전시간은 160ms이고 적용된 캐패시터 충전기에 의해 구동 가능한 최대 반복율은 식 (2)에 의해 6.25Hz임을 알 수 있다. 그러나 충전완료 후 이루어지는 RSD 스택의 동작시간과 충전기의 안정된 구동에 필요한 휴지시간 등을 고려하여 실제의 경우 수냉식에 의한 냉각없이 2Hz의 반복율로 동작되었다.

RSD 스택 시스템에서 적용된 부하는 무유도성 저항 부하로서 특성 임피던스와 허용 가능한 출력 펄스전류의 크기를 고려하여 결정되었고 설계된 저항값과 예상되는 출력전류 피크값, 그리고 부하저항에 전달되는 에너지는 다음의 식에 의해 계산할 수 있다.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_C}{C_K}} \quad (3)$$

$$Z_T = Z_o + Z_L \quad (4)$$

$$I_L = \frac{V_C}{Z_T} \quad (5)$$

여기서, 특성 임피던스 Z_o 는 2 μ H의 포화 쇼크 인덕턴스 L_C 와 32 μ F의 파워 캐패시터스 C_K 로부터 0.25 Ω 임을 알 수 있고 부하저항 Z_L 을 0.4 Ω 로 선정하였을 경우, 예상되는 출력전류 피크값 I_L 은 10kV 충전 전압에서 약 15.4kA임을 확인할 수 있다.

$$E_S = \frac{1}{2} C_K V_C^2 \quad (6)$$

$$P_L = E_S f_R \quad (7)$$

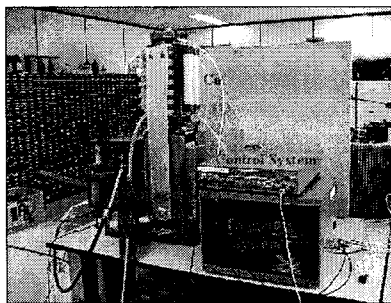


그림 4. 10kV 20kA급 RSD 스택 시스템

항에 전달될 수 있는 최대 에너지를 나타내고 있는데 파워 캐패시터스 32 μ F와 최대 충전 전압 10kV를 대입해 보면 최대 에너지는 1600J이고 6Hz의 반복율 f_R 로 연속 동작할 경우, 부하에 전달되는 전력 P_L 은 식 (7)에 의해 9600W로 계산되어 진다. 이러한 계산 결과를 고려하여 전체 RSD 스택 시스템에서는 출력부하로서 10kW 0.4 Ω 의 무유도성 저항부하를 사용하였다.

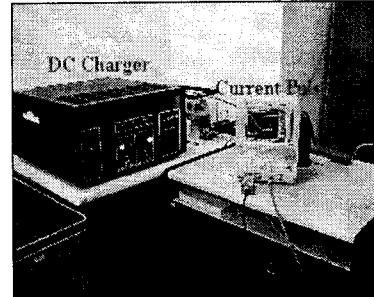


그림 5. 20kV 20kA급 캐패시터 충전기

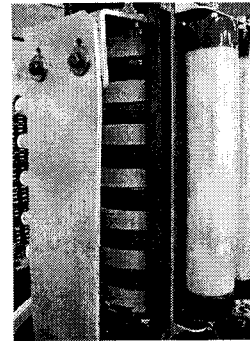


그림 6. RSD 스택 모습

2.5 실험 결과

그림 7은 펌핑 캐패시터의 충전 전압이 8kV일 때, RSD 스택을 트리거 시키기 위해 공급되는 펌핑 전류의 파형을 보여주고 있다. 모든 전류 파형은 PEARSON ELECTRONICS사에서 제작된 펄스전류 모니터 (0.001V/A)를 사용하여 측정되었으며 그림 7에서 보듯 펌핑 전류의 최대 피크값은 약 900A, 펄스폭은 1 μ s, di/dt는 3000A/ μ s 정도임을 확인할 수 있다.

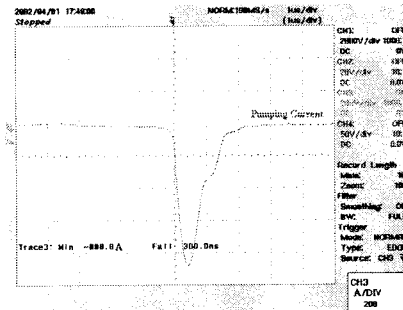
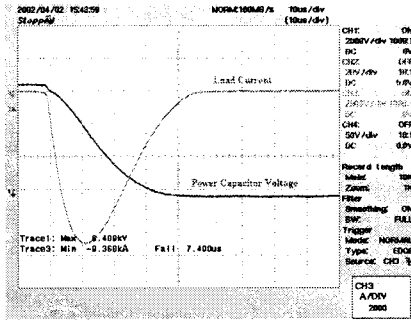
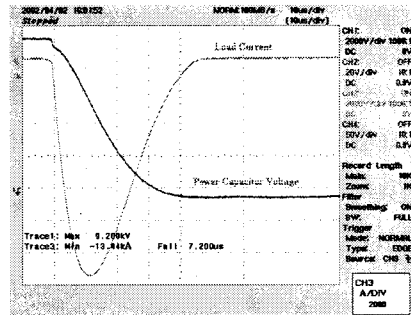


그림 7. RSD 스택 구동을 위한 펌핑 전류

식 (6)은 RSD 스택을 통해서 단일 펄스전류로 부하저



(a) 입력된 충전 전압 : 7[kV]



(b) 입력된 충전 전압 : 10[kV]

그림 8. 충전 전압에 따른 RSD 스택 시스템의 부하 전류

그림 8은 출력 펄스전류를 발생시키기 위한 에너지를 공급해 주는 파워 캐패시터의 충전 전압 변화에 따른 RSD 스택 시스템의 부하 전류 파형을 보여주고 있다. 그림 8에서 나타나 있듯 파워 캐패시터에 충전되는 전압 값이 다소 낮은 이유는 고전압 캐패시터 충전기와 파워 캐패시터 사이에 시스템의 보호 측면에서 50% 정도의 고전압 무유도 저항이 결선되어 있기 때문이며 실험 파형에서 보듯 파워 캐패시터의 충전 전압이 7kV에서 10kV로 증가할 경우, RSD 스택을 통해서 부하에 전달되는 펄스전류의 최대 피크값은 10kA에서 14kA 정도로 증가되고 펄스폭은 약 30μs, di/dt는 1500~2000A/μs임을 알 수 있다. 기존에 펄스파워 용도로 사용되고 있는 최대 정격전압 2.5kV, 소자의 지름 75~100mm인 사이리스터의 전류용량이 1000A, di/dt가 1000A/μs 정도임을 비교해 보아도 RSD 스위치가 가격적인 장점 이외에도 전류용량, di/dt 측면에서도 큰 장점을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

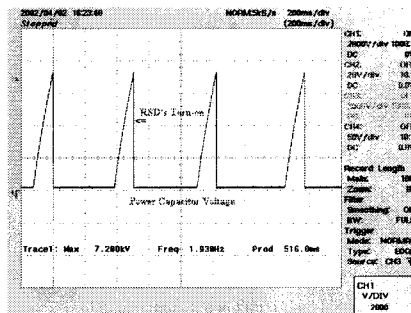


그림 9. 반복율 2Hz에서의 파워 캐패시터 전압

그림 9는 입력되는 충전 전압이 8kV이고 RSD 스택 시스템을 통해 부하저항에 전달되는 펄스전류의 반복율이 2Hz일 때, 파워 캐패시터의 전압파형을 보여주고 있다. 파형에서 살펴볼 수 있듯이 파워 캐패시터를 8kV까지 충전하는데 소요된 시간은 120ms 정도이며 이때 허용 가능한 최대 반복율은 8Hz이다. 이처럼 고전압 캐패시터 충전기가 갖고 있는 충전용량의 한계 때문에 더 이상의 고반복 연속운전은 수행하지 못하였으나 장시간의 연속운전 상태에서 RSD 스택의 뛰어난 스위칭 특성과 안정성을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 최근 펄스파워 용도로 개발된 RSD를 이용한 10kV 20kA급 펄스파워용 RSD 스택 시스템의 설계 및 제작에 관한 연구결과를 다루었으며 RSD 소자의 동작원리와 구동기술, RSD 스택 시스템의 구성 및 구현에 대해 설명하고 실험을 통하여 RSD 소자를 적용한 펄스발생기의 동작 특성을 확인하였다.

RSD는 기존 스파크 갭, 사이라트론 등과 같은 진공 스위치에 비해 수명이 길고 유지보수도 쉬우며 무엇보다도 낮은 제작비용과 우수한 대전력 스위칭 능력을 갖고 있는 반도체 스위치로서 현재 환경 및 군사분야 관련 장비 등에서도 많은 적용이 시도되고 있다. 그러나 안정적인 대전력 스위칭에 필요한 펄스형태의 펌핑 전류를 공급하기 위해서는 트리거 회로의 용량과 크기가 커져야 하는 단점이 있게 되고 이는 RSD 소자와 응용 시스템의 상업화에 큰 장애가 되고 있다.

앞으로 RSD 스택 시스템의 안정성을 향상시키기 위하여 RSD 스택 자체의 캐패시턴스의 영향과 포화초크에 대한 특성분석 등이 추가적으로 이루어질 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] F. Endo, M. Souda, C. Yamazaki, K. Okamura, and K. Fukushima, "All-solid-state Pulsed Power Modulator for High Power, High Repetition Rate Applications", Proc. 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., vol. II, pp. 1417-1420, 1999
- [2] S. Ibuka, T. Osada, K. Jingushi, M. Suda, T. Nakamura, K. Yasuoka, and S. Ishii, "Pulsed Power Generator Utilizing Fast SI-Thyristors for Environmental Applications", Proc. 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., vol. II, pp. 1441-1444, 1999
- [3] A. Welleman, E. Ramezani, J. Waldmeyer, and S. Gekenidis, "Semiconductor Components up to 12kV and 150kA for Closing Switches", Proc. 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., vol. II, pp. 1268-1271, 1999
- [4] I.V. Grekhov, S.V. Korotkov, and L.S. Kostina, "High Power Semiconductor Switch - Reverse Switch-on Dynistor and its Applications", Proc. 1st Int. Symp. on Pulsed Power and Plasma Applications, pp. 175-179, 2000