

고속 방전 · 충전 스위칭 전원차단회로 설계 제작 및 특성분석

이민웅¹ · 조성익^{2*} · 이남호¹ · 정상훈¹

Implementation of crowbar circuit for high-speed discharge-charge switching and its characteristic analysis

Min-woong Lee¹ · Seong-ik Cho^{2*} · Nam-ho Lee¹ · Sang-hun Jeong¹

¹Department of Nuclear convergence technology, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

^{2*}Department of Electronic engineering, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

요 약

본 논문에서는 기존 전원차단회로의 공급전원 차단·복귀 시간 지연 문제를 해결하기 위하여 고속 방전·충전 스위칭 기능을 갖는 새로운 전원차단회로를 제안하였다. 제안된 전원차단회로는 공급전원 고속 차단 후 복귀(충전) 속도를 증가시키도록 설계함으로써 전자시스템의 방사선 노출 시간과 펄스 방사선이 지나간 후 정상동작하기 위한 시간을 줄였다. 하드웨어를 구현하기 전 방전·충전 시간의 시뮬레이션은 Cadence 사의 pspice tool을 이용하여 진행하였으며 소자레벨에서 DUT(Device Under Test) 보드를 제작하였다. 전원차단회로의 비교 측정은 24V용 인공위성 전자소자를 대상으로 수행되었다. 그 결과, 제안된 회로는 기존 회로에 비하여 방전속도 96.8%, 복귀속도 27.3% 향상으로 고속 기능이 구현됨을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we proposed a novel crowbar circuit for high-speed discharge-charge switching to solve discharge-charge-time delay of supply voltage in the conventional crowbar circuit. The proposed circuit is designed to increase the charge-speed after high-speed discharge of supply voltage, thereby reducing the time exposed to radiation damage and, the normal operation time of electronic system after passing the pulse radiation. The simulation of the discharge-charge-times before the implement of the hardware is conducted using Cadence's pspice tool, and DUT (Device Under Test) board is fabricated in the device level. The comparison measurement of the crowbar circuits is performed on the satellite-electronic device for 24V. As the result, we confirmed the high-speed function of the proposed circuit by improvement of the discharge-speed 96.8% and the charge-speed 27.3% as compared with the conventional circuit.

키워드 : 펄스 방사선, 전원차단회로, 방전·충전 시간, 고속 방전·충전, 전자소자

Key word : Pulse radiation, Crowbar circuit, Discharge-charge-time, High-speed discharge-charge, electronic device

Received 28 February 2017, Revised 14 March 2017, Accepted 28 March 2017

* Corresponding Author Seong-ik Cho(E-mail:sicho@jbnu.ac.kr, Tel:+82-63-270-4137)

Department of Electronic engineering, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.5.885>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

우주공간에서 방사선에 의한 피해현상 중 과도방사선효과 (Transient Radiation Effect)는 고에너지의 펄스 형태를 갖는 감마선이 순간적으로 입사되어 발생하는 현상으로, CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 전자소자에 입사되면 이온화 현상을 유발함으로써 대량의 EHP (Electron/Hole Pairs)가 생성되고 CMOS 전자소자 내부의 광전류가 유기된다. 바이어스가 인가된 상태에서 광전류는 전자소자의 데이터 오류를 일으키는 업셋 (Upset) 현상을 유발하거나 소자 내의 기생 사이리스터 (Thyristor)를 동작시켜 래치-업 (Latch-up) 현상을 발생시킨다[1,2]. 래치-업 현상이 지속되면 소자의 번-아웃 (Burn-out) 현상으로 이어져 전자시스템 전체를 손상시킨다[3,4]. 따라서, 펄스 방사선 입사시 검출신호를 입력 받아 업셋, 래치-업 현상이 발생하기 전에 전자소자의 메인전원을 차단하여 전자소자를 보호하는 전원차단회로가 필요하다[5,6]. 전자소자의 피해를 최소화하기 위하여 메인전원이 방전되는 시간을 줄여야하며, 실시간 전자시스템에 적용하기 위하여 방전 후 복귀되는 시간 지연을 줄이기 위한 노력이 필요하다.

기존 전원차단회로는 큰 부하용량을 갖는 인공위성이나 우주선의 전자소자의 메인전원을 제어하는 경우, 전원을 방전하고 복귀하는데 많은 시간 지연이 발생한다. 본 논문에서는 과도 방사선 효과로부터 메인전원을 고속으로 차단하여 피해를 최소화하고 방사선이 지나간 후 전자시스템이 정상 동작할 수 있도록 빠른 대응을 위하여 고속으로 전원을 복귀 시키는 새로운 전원차단회로를 제안한다. 또한, 제안된 전원차단회로의 설계/제작을 통하여 실측 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장 본문에서는 기존 전원차단회로와 제안하는 전원차단회로의 설계 및 시뮬레이션 결과를 논하고, 설계된 고속 전원차단회로를 제작/실측하였으며 기존 전원차단회로와 비교 분석하였다. 그리고 III장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

2.1. 새로운 고속 방전 후 복귀 스위칭 전원차단회로

펄스 방사선 검출기의 부가회로로서 이전의 전원차단회로는 사이리스터를 동작시켜 부하로 공급되는 전원을 방전시키고, 그 후 전원을 다시 공급하기 위하여 사이리스터를 완전히 Off시켜야 한다. 이를 위하여 실시간으로 공급되어야 하는 메인 전원을 완전히 차단 후 다시 인가해야함에 따라 추가 회로가 필요하고 전원이 복귀되는데 지연시간이 발생한다. 따라서, 전원 차단 후 복귀 기능이 없기 때문에 실시간 전자시스템에 적용이 불가능한 단점을 갖는다[5,6]. 이러한 단점을 개선한 기존 전원차단회로는 펄스 방사선에 의하여 검출된 신호를 입력으로 받아 전자소자의 메인전원을 차단하고 일정 시간 이후 복귀시키는 기능을 수행함으로써 실시간으로 전자 시스템을 보호할 수 있다[7]. 그러나 큰 부하용량을 제어하는 경우, 전원차단 지연시간이 발생하여 전자소자가 방사선에 노출되는 시간이 증가하고 복귀 시 지연시간을 유발함에 따라 전자소자의 정상기능 수행에 영향을 끼칠 뿐만 아니라 기존회로에 사용된 포토커플러 (Photo coupler)는 과도한 열이 발생시켜 소자 번-아웃의 위험을 초래한다. 또한, 입력신호를 증폭시키는 과정에서 추가적으로 전원전압(5V)이 필요하다는 단점이 있다[7]. 따라서, 본 논문에서는 기존회로의 단점을 개선하고 고속 전원차단 후 복귀기능을 갖는 회로를 설계하였다.

2.1.1. 기존 전원차단회로 설계

이전 특허회로인 전원차단회로[5]를 실시간으로 적용시키기 위하여 복귀 기능을 추가시킨 기존 전원차단회로는 그림 1과 같이 달링턴 트랜지스터 (Darlington transistor), BJT (Bipolar junction transistor), 저항, 포토커플러로 구성되어 있으며, 실시간 전자 시스템에 적용하기 위하여 사이리스터를 DC 이득이 크고 달링턴 트랜지스터로 대체함으로써 추가적인 회로 없이 전원 차단 후 복귀 기능을 갖도록 설계되었다[7].

기존 전원차단회로는 공급전원 24V, 부하용량 $R_L=100k\Omega$, $C_L=200\mu F$ 을 갖는 우주공간에서의 전자소자를 대상으로 설계되었고 추가적으로 5V의 전원을 포함한다. 그림 1은 기존 전원차단회로의 회로도도를 나타내며, 펄스 방사선 검출신호인 TRD 신호가 High(5V)일 때 출력 POUT(24V)은 공급전원을 그대로 유지하고 TRD 신호가 Low(0V)로 떨어질 때 공급전원이 차단되고 잔류 전하를 방전시킬 수 있도록 설계되었으며, 다

시 TRD 신호가 High(5V)로 복귀되면 차단된 공급전원이 다시 정상적으로 인가된다.

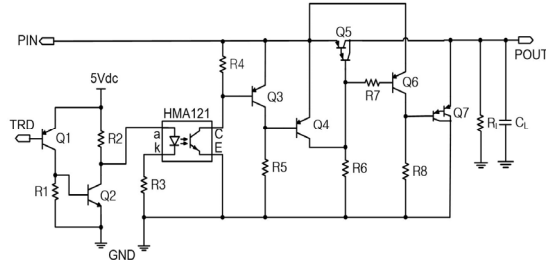


Fig. 1 Conventional crowbar circuit

그림 1의 TRD 입력으로 High 신호가 인가되면 포토 커플러가 동작하고 달링턴 트랜지스터 Q5가 On 상태가 되어 Q7이 Off되므로 공급전원을 그대로 출력하고, TRD에 Low 신호가 인가되면 포토커플러가 동작하지 않기 때문에 달링턴 트랜지스터 Q5가 Off되고 Q7이 On되어 방전부 회로가 동작하여 POUT 전압이 GND로 방전하게 된다. 이 때 다시 TRD 신호가 High가 되면 달링턴 트랜지스터 Q5가 정상적으로 On이 되고 Q7이 Off되므로 POUT에 정상적으로 전압을 공급할 수 있다. 기존 회로의 상세한 동작은 다음과 같다.

기존 전원차단회로의 초기상태(정상동작)는 PIN에 24V의 전원이 공급되고 5Vdc에는 5V 전원이 공급된다. TRD 단자에 5V가 인가되면 Q1은 Off 상태에 있고 Q2의 베이스 전압이 0V가 되므로 Q2도 Off 되어 포토 커플러의 입력에 5V가 인가되어 포토커플러가 On이 된다. 포토커플러 HMA121이 On이 되면 Q3의 베이스 전압이 낮아지므로 Q3이 동작하고 Q4의 베이스 전압이 상승한다. Q4는 Off 상태가 되고 저항 R6에 의해 Q5의 베이스 전압이 낮아지므로 Q5가 On이 되어 POUT에 24V를 공급한다. Q6은 On이 되므로 Q7의 베이스가 High가 되어 Q7은 Off된다.

TRD 단자에 0V가 인가되면 Q1의 베이스 전압이 0V가 되어 Q1이 On이 된다. Q1이 On이 되면 Q2의 베이스 전압이 High가 되고 Q2의 컬렉터 전압이 Low가 되어 포토커플러가 Off된다. 포토커플러가 Off되면 Q3의 베이스에 24V가 인가되어 Q4가 Off된다. Q3이 Off되면 Q4의 베이스 전압이 Low가 되어 Q4가 동작하고 Q5의 베이스에 High가 인가되어 Q5가 Off된다. 스위칭 역

할을 하는 Q5가 Off되면 전원이 차단되므로 POUT에 24V가 인가되지 못한다. Q5의 베이스 전압이 High가 되면 Q6의 베이스 전압 또한 High가 되므로 Q6이 Off 되고 Q7의 베이스 전압이 Low가 되어 Q7이 동작한다. Q7이 동작하면 POUT과 GND가 연결되어 잔류 전하들이 GND로 방전된다[7]. 전자소자의 래치-업이 유지되기 위해서는 전원이 계속적으로 공급되어야 한다. 기존 전원차단회로는 전자시스템의 전원을 차단하고 잔류 전하를 방전하므로 전자시스템의 래치-업으로 인한 번아웃을 방지할 수 있으며, 실시간 전자시스템에 적용이 가능하지만 몇 가지 단점을 갖는다.

먼저, 펄스 방사선에 의한 피해를 최소화해야 하는 주요 우주선이나 인공위성의 전자시스템과 같은 큰 부하용량을 갖는 회로를 제어할 경우, 부하 저항 R_L 과 커패시터 C_L 에 의하여 공급전원의 방전시간과 복귀(충전) 시간에 많은 지연이 발생한다. 따라서, 펄스 방사선에 노출되는 시간을 최대한 줄여야하고 펄스 방사선이 지나간 후 빠른 대응이 필요한 실시간 전자시스템에서 정상동작 상태로 복귀되는 속도를 증가시켜야 한다.

또한, 기존 전원차단회로는 검출신호를 증폭하는 입력단과 전원을 방전시키는 출력단을 전기적으로 차단하기 위하여 포토커플러를 사용하였다. 포토커플러는 초기 정상상태에서 항상 On상태를 유지해야하기 때문에 모듈에서 과열이 발생하는 문제를 갖는다. 과열이 지속될 경우 독립적인 신호 라인들이 불거나, 떨어질 우려가 있어 회로 동작에 이상이 발생할 수 있다. 그 뿐만 아니라 검출신호를 증폭하는 입력단에 추가로 5V 전원전압이 필요하기 때문에 그에 따른 회로나 단자가 요구되는 문제점이 있다.

2.1.2. 제안된 고속 전원차단회로 설계

앞서, 언급된 기존 전원차단회로의 단점을 개선하기 위하여 고속 차단·복귀 스위칭 기능을 갖는 전원차단회로를 제안하였다. 기존 회로와 제안된 회로의 방전(차단)시간과 복귀(충전)시간을 비교하기 위하여 동일한 조건으로 설계하였으며, 입력신호는 방사선 검출기가 펄스 방사선을 감지하였을 때 출력되는 검출신호를 펄스 형태로 인가하여 검출신호에 따른 부하로 전달되는 공급전압의 변화를 측정하였다[5,8].

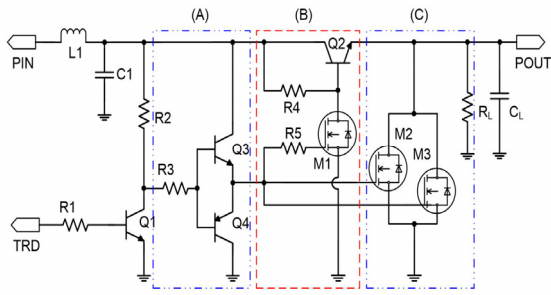


Fig. 2 Proposed crowbar circuit with high-speed discharge and charge function

그림 2는 본 논문에서 제안한 고속 전원차단회로로써 기존의 방전 후 복구 기능을 갖는 전원차단회로에 비하여 고속 동작 가능한 회로를 보여준다. 제안된 회로는 인덕터, 커패시터, BJT, 스위칭소자 (달링턴 트랜지스터), 방전소자 (Power MOSFET)로 구성이 되어 있으며, PIN 노드는 메인전원을 공급하는 단자이며, POUT은 전원 공급을 받는 전자 시스템과 연결되는 단자이다. TRD 노드는 펄스 방사선 검출기의 검출신호를 받는 단자로 TRD 입력이 High(펄스 방사선 검출 전)일 경우 방전소자 M2와 M3의 게이트에 Low 전압이 인가되고, 스위칭소자 Q2의 게이트에 High가 인가되어 방전소자 Off, 스위칭소자 On 상태에 있다. 따라서 PIN을 통해 공급된 전원이 그대로 LOAD로 출력된다. 기존 전원차단회로와 마찬가지로 TRD 입력이 Low(펄스 방사선 검출 시)가 되면 방전소자의 게이트에 High 전압이 인가되고, 스위칭소자의 게이트에 Low가 인가되어 방전소자 On, 스위칭소자 Off 상태가 된다. 따라서, PIN을 통해 POUT으로 입력되는 전하들은 스위칭 소자가 Off됨에 따라 차단되고, LOAD에 남아있던 전하들은 방전소자를 통해 GND 빠져 나감으로써 전자시스템의 전원 공급단자인 POUT의 전압이 차단된다.

제안된 전원차단회로는 공급전원의 고속 방전을 위하여 방전소자 M2, M3로 인가되는 증폭된 TRD 입력 신호의 상승시간을 단축시키기 위하여 그림 2의 (A)와 같이 Q3와 Q4를 이용한 드라이버 버퍼를 사용하였다. 따라서, 버퍼를 통하여 입력되는 펄스신호는 스위칭소자 Q2와 방전소자 M2, M3의 On/Off 시간을 단축시키는 역할을 할 수 있도록 설계되었으며, (C)와 같이 방전소자 M2와 M3 2개를 병렬 연결하여 방전소자가 On되

었을 때 방전시간에 영향을 주는 주요 파라미터인 R_{on} 저항을 1/2로 줄임으로써 고속 방전할 수 있도록 하였다. 이 때, R_{on} 저항 값이 매우 작기 때문에 병렬 연결되는 방전소자의 수가 3개 이상 증가하더라도 전체 R_{on} 저항의 값은 크게 감소하지 않는다. 따라서, 방전소자를 3개 이상 병렬연결하는 것은 방전시간을 줄이는데 큰 영향을 주지 않기 때문에 제안된 회로는 2개만을 이용하여 병렬 연결하였다.

또한, 큰 부하저항을 갖는 장비나 기기의 메인전원이 복귀(충전)될 때 스위칭소자의 R_{on} 이 매우 작기 때문에 큰 부하저항(R_L)은 무시될 수 있다. 따라서, 스위칭소자의 스위칭 속도를 증가시켜 메인전원이 복귀되는 시간을 줄여야한다. 제안된 회로는 (B)와 같이 스위칭소자의 컬렉터와 베이스 사이에 작은 저항(R4)을 연결함으로써 스위칭소자가 On되는 시간을 줄였기 때문에 POUT으로 흘러가는 전류의 속도를 증가시켰다. 따라서 기존 회로에 비하여 고속으로 공급전원 복귀가 가능한 장점이 있다.

그 뿐만 아니라, 기존의 TRD 검출신호를 증폭하는데 필요한 입력단 5V 전압을 24V 전압으로 공유하였기 때문에 추가적인 회로나 단자가 필요하지 않고, 구조적으로 포토커플러를 사용하지 않아 과열이 발생하는 것을 방지하였다. 추가적으로 기존 회로에서 스위칭소자와 방전소자의 On/Off 동작이 동시에 발생할 경우 유발되는 과전류 방지를 위하여 본 고안은 스위칭소자의 게이트와 연결된 Power MOSFET을 통하여 방전소자가 먼저 On이 되고, 그 후에 스위칭소자가 Off될 수 있도록 타이밍을 조절하였다.

따라서, 본 논문의 고속 방전 후 복구 전원차단회로는 기존 전원차단회로의 단점들이 개선하여 방사선에 노출 위험이 있는 실시간 전자시스템에 적용하여 피해를 최소화할 수 있을 것이다.

2.2. 제안된 전원차단회로 시뮬레이션

시뮬레이션은 공급전압 24V와 부하용량 $R_L=100k\Omega$, $C_L=200\mu F$ 에서 진행하였으며, Cadence사의 pspice tool을 이용하였다. 그림 3은 제안된 전원차단회로의 TRD 입력에 따른 POUT 출력 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 검출신호(TRD)가 High이면 POUT으로 24V 전원을 공급하고 Low로 떨어지면 POUT의 전압이 0V로 방전되며 다시 High로 복귀하면 POUT 전압 역시 24V로 복

귀함에 따라 정상적으로 공급전압 24V를 차단하고 복귀하는 기능을 확인하였다.

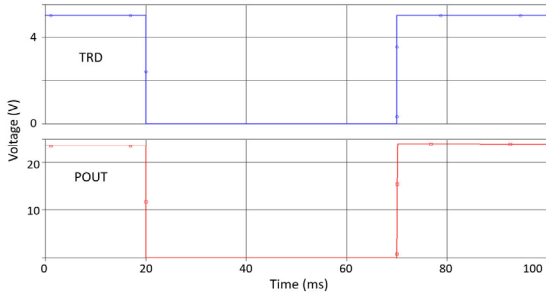


Fig. 3 Simulation result for operation verification of proposed crowbar circuit

그림 4는 검출신호 TRD가 Low로 변할 때 공급전압 24V의 방전시간 비교를 나타내며, (a)는 기존 전원차단 회로 (b)는 제안된 고속 전원차단회로의 방전시간이다. 방전시간은 공급전압 24V에서 2.4V(10%)까지 떨어지는 시간을 측정하였다. 방전시간은 기존 회로 516 μ s, 제안된 회로 5.6 μ s로 제안된 회로는 기존 회로에 비하여 방전속도가 98.9% 향상되었다.

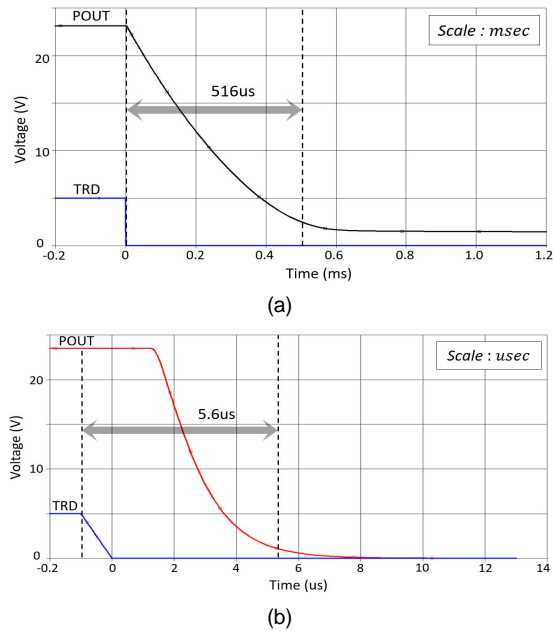


Fig. 4 Simulation results of discharge-time (a)conventional crowbar circuit (b)proposed crowbar circuit

그림 5는 검출신호 TRD가 Low에서 High로 복귀될 때 0V로 방전된 POUT 전압이 24V로 충전되는 복귀시간의 비교를 나타내며, (a)는 기존 전원차단회로 (b)는 제안된 고속 전원차단회로이다. 복귀시간은 공급전압 24V의 21.6V(90%)까지 상승하는 시간을 측정하였다. 제안된 회로는 공급전압이 복귀될 때 스위칭소자의 스위칭 속도를 증가시켰기 때문에 고속복귀 기능이 확인되었으며 복귀시간은 기존 회로 590 μ s, 제안된 회로 155.5 μ s로 제안된 회로는 기존 회로에 비하여 충전속도 73.6% 향상되었다.

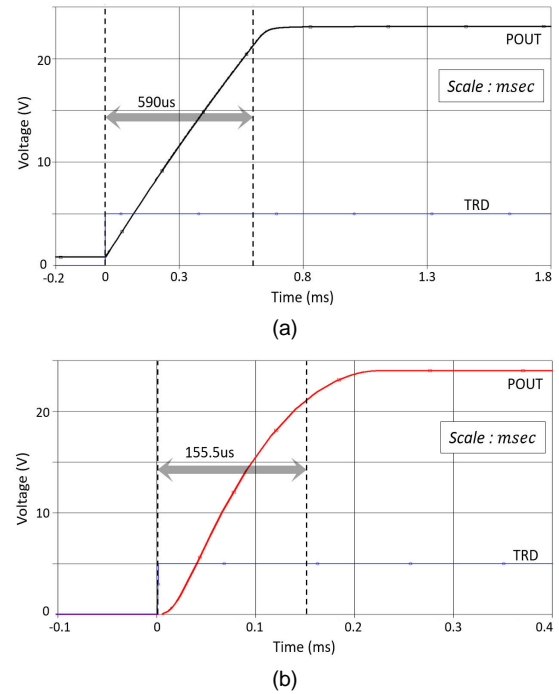


Fig. 5 Simulation results of charge-time (a)conventional crowbar circuit (b)proposed crowbar circuit

2.3. 제안된 고속 전원차단회로 제작 및 측정

제안된 전원차단회로의 실측 검증을 위하여 PCB기반으로 설계 제작하였다. 그림 6은 측정용 제안된 회로의 DUT (Device under test) 보드를 구현한 것이며, BJT, 달링턴 트랜지스터, 파워 MOSFET, 인덕터, 칩 커패시터, 칩 저항을 이용하였고, 부하용량은 저항 100k Ω , 커패시터 200 μ F으로 제작하였다. 기존의 전원차단회로와 제안된 전원차단회로의 방전시간과 복귀시간을 비

교하기 위하여 공급전압 24V, TRD 입력펄스 0V~5V로 동일조건을 적용하여 측정하였다.

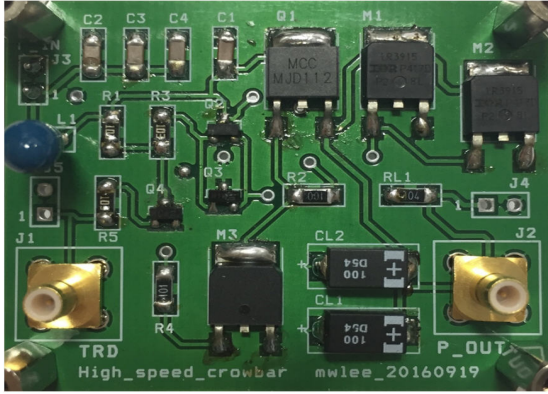


Fig. 6 DUT board of proposed crowbar circuit for measuring

그림 7은 제작된 전원차단회로의 기능검증 결과로 모의실험과 같은 결과를 나타내며, 펄스 방사선을 모의한 입력 펄스신호에 따라 부하(POUT)로 공급되는 전압이 방전되고 복구되는 기능을 확인하였다.

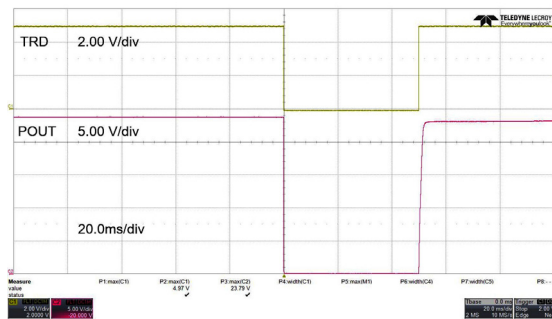
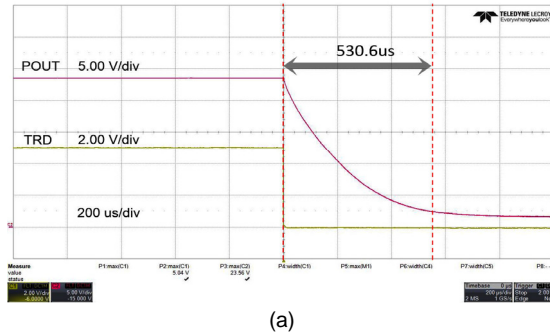
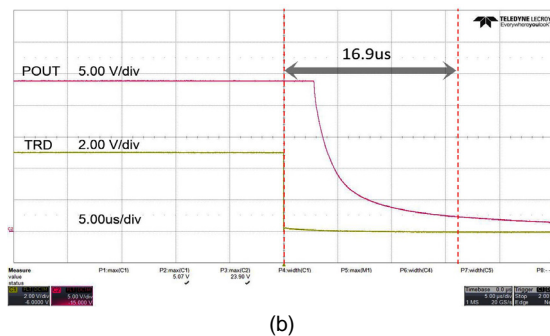


Fig. 7 Test result for operation verification of proposed crowbar circuit

측정 시 방전시간의 기준전압은 2.4V(24V의 10%)이고 충전시간의 기준전압은 21.6V(24V의 90%)로 모의실험과 동일하게 측정하였다. 방전시간 측정 결과, 그림 8과 같이 기존 회로 530.6 μ s, 제안된 회로 16.9 μ s로 제안된 회로는 기존 회로에 비하여 방전속도가 96.8% 향상되었으며, 방전 후 복구시간은 그림 9와 같이 기존 회로 1098 μ s, 제안된 회로 789.5 μ s로 제안된 회로는 기존 회로에 비하여 27.3% 향상되었다.

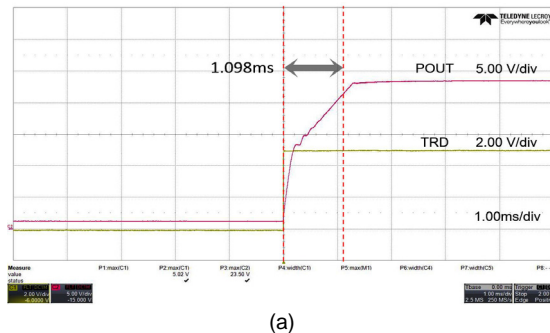


(a)

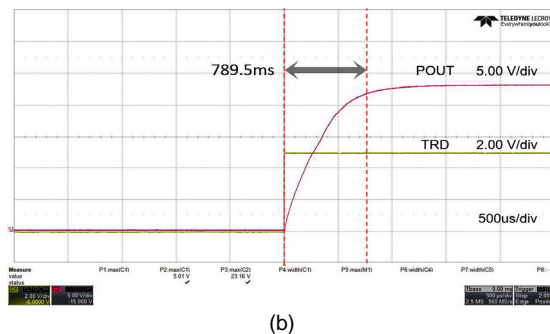


(b)

Fig. 8 Test results of discharge-time (a) conventional crowbar circuit (b) proposed crowbar circuit



(a)



(b)

Fig. 9 Test results of charge-time (a) conventional crowbar circuit (b) proposed crowbar circuit

이때, 측정 결과는 모의실험 결과에 비해 전체적으로 충·방전 시간 지연이 발생하였다. 이는 공급전압 24V가 충·방전 시 측정 케이블의 저항이나 커패시터 성분, 전원 공급기의 전류 제한 등과 같은 비이상적 원인에 인한 것이며, 제안된 회로와 기존 회로의 측정 조건과 비이상적 조건을 동일하게 구현하여 두 회로의 충·방전 속도를 비교하였다.

전원차단회로의 비교 분석 결과는 표 1에 정리하였으며, 제안된 전원차단회로는 기존 회로에 비하여 전자시스템의 공급전원을 고속으로 방전하고 복귀시킴으로써 방사선에 노출되는 시간을 줄이고 다시 전원을 빠르게 공급시킴으로써 방사선에 의한 피해를 줄일 수 있을 것이다.

Table. 1 Comparison about discharge and charge time of crowbar circuits

#	Pram.	Discharge-time(μ s)		Charge-time(μ s)	
		Simul-ation	Test	Simul-ati on	Test
	Conventional crowbar circuit[7]	516	530.6	590	1098
	Proposed crowbar circuit	5.6	16.9	155.5	789.5
	Betterment proportion(%)	98.9	96.8	73.6	27.3

III. 결 론

본 논문에서는 과도 방사선 효과에 의한 전자소자의 피해를 줄이기 위한 연구의 일환으로 펄스 방사선 검출기의 검출신호를 입력으로 받아 전자소자의 공급전원을 일정시간 동안 차단함으로써 래치-업 현상을 방지하여 전자소자의 번-아웃 피해를 최소화 할 수 있는 고속 방전·충전 기능을 위한 전원차단회로를 제안하였다. 제안된 전원차단회로는 방전 후 복귀 기능이 가능하기 때문에 실시간 전자시스템이 적용이 가능하고, 기존 회로가 갖는 방전·충전 시간 지연을 줄여 펄스 방사선 피해에 노출되는 시간을 최소화할 수 있다. 또한, 펄스 방사선이 지나간 후 전자 시스템의 정상동작을 위한 공급전압이 다시 인가될 때 스위칭소자가 On되는 시간을 줄

였기 때문에 기존 회로에 비하여 고속으로 공급전원 복귀가 가능한 장점이 있다.

따라서, 제안된 고속 전원차단회로를 우주환경이나 전시환경에서 인공위성이나 우주선의 전자시스템에 적용한다면 펄스 방사선에 의한 과도 방사선 효과로부터 피해를 최소화할 수 있기 때문에 전자시스템의 내방사 선화를 위하여 요구되는 비용보다 저렴한 비용으로 같은 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by the Core Technology R&D program through the Defense Industry Technology Center, and the Ministry of Science, ICT & Future Planning.

REFERENCES

- [1] J. F. Leavy, R. A. Poll, "Radiation-Induced Integrated Circuit Latchup," *IEEE Transactions Nuclear Science*, vol. 16, no. 6, pp. 96-103, Dec. 1969.
- [2] C. Lewis, M. Espig, A. Wolicki, M. Simons, C. Rogers, A. Costantine, *Transient Radiation Effects on Electronics (TREE) Handbook*, DNA., Alexandria, Tech. Rep. DNA-H-95-61, Dec. 1995.
- [3] D. R. Alexander, "Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits," *IEEE Transactions Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, pp. 565-582, Jun. 2003.
- [4] S. C. Oh, N. H. Lee, and H. H. Lee, "The Study of the transient radiation effects on electronic devices caused by pulsed high energy gamma-ray," in *proceeding of the 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, Jeju Island, pp. 1234-1236, Oct. 2012.
- [5] L. Larry, NUCLEAR EVENT DETECTOR, US Patent 4,687,622, to IRT Corp., Patent and Trademark Office, San Diego, Calif., 1987.
- [6] G. Douglas. et al., SOLID STATE CROWBAR CIRCUIT, US Patent 3,569,784, to USAEC, Patent and Trademark Office, San Jose, Calif., 1968.

- [7] S. H. Jeong, N. H. Lee, and S. I. Cho, "A Design of High-speed Power-off Circuit and Analysis," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 4, pp. 490- 494, Mar. 2014.
- [8] D. E. Fulkerson, D. K. Nelson, R. M. Carlson, E. E. Vogt, "Modeling Ion-Induced Pulses in Radiation-Hard SOI Integrated Circuits," *IEEE Transactions Nuclear Science*, vol. 3, no. 3, pp. 1406-1505, Aug. 2007.



이민웅(Min-Woong Lee)

2012년 전북대학교 전자공학과 학사 졸업
2014년 전북대학교 전자공학과 석사 졸업
2016년 전북대학교 전자공학과 박사 수료
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 연구원
※관심분야 : 아날로그 집적회로 설계, 내방사선 전자소자



조성익(Seong-ik Cho)

1987년 전북대학교 전기공학과 학사 졸업
1989년 전북대학교 전기공학과 석사 졸업
1994년 전북대학교 전기공학과 박사 졸업
현재 : 전북대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : 저전력 고속 DRAM, ADC/DAC, 아날로그 회로, 고속 데이터 인터페이스, Filter



이남호(Nam-Ho Lee)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업
2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원
※관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템



정상훈(Sang-Hun Jeong)

2007년 전북대학교 반도체 과학기술학과 학사 졸업
2009년 전북대학교 전자정보공학부 석사 졸업
2014년 전북대학교 전자정보공학부 박사 졸업
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 선임연구원
※관심분야 : 아날로그 회로설계, 내방사선 회로설계