

사전충전모드를 통한 SCALDO 레귤레이터의 초기 동작특성 개선

Improvement of Initial Operating Characteristics of SCALDO Regulator by Pre-charger

권 오 순[★], 손 준 배*, 송 종 규*

O-Soon Kwon[★], Joon-Bae Son*, Jong-Gyu Song*

Abstract

A SCALDO(Supercapacitor Assisted LDO) regulator is a newly studied regulator to improve the efficiency of a LDO regulator. Commonly a LDO regulator has very low efficiency and a SCALDO regulator can improve it considerably because this regulator can reuse meaninglessly wasted energy at the LDO regulator by a supercapacitor which is attached between input and a LDO regulator. However this regulator has several challenges because it is a being studied regulator. One of them is an overvoltage issue. At initial operating of this regulator, a supercapacitor is totally discharged and input is connected with a supercapacitor and a LDO regulator in series. Thus, input voltage is enabled to a LDO regulator and this input voltage is a significant value to a LDO regulator because commonly input voltage is bigger than twice output voltage. In this paper, to solve this overvoltage issue, we proposed a new SCALDO regulator that has a pre-charger for charging a supercapacitor before starting operation. And we found that a proposed SCALDO regulator can properly reduce overvoltage of a LDO regulator through experiments.

요 약

SCALDO(Supercapacitor Assisted LDO) 레귤레이터는 기존 LDO(Low Drop-out) 레귤레이터(이하 LDO)의 낮은 효율을 개선하기 위해 연구되고 있는 회로로서, 회로의 입력단과 LDO 사이에 슈퍼커패시터를 부착하여 입력과 출력 전압의 차이에 의해 발생하는 불필요한 전력손실을 재사용함으로써 LDO의 효율을 향상시킬 수 있다. 하지만 SCALDO 레귤레이터는 현재 연구 중에 있는 회로로 몇 가지 개선되어야 할 사항들이 남아있다. 그 중 한 가지는 회로의 최초동작 시 LDO에 인가되는 과전압문제이다. 회로의 최초동작 시 슈퍼커패시터가 완전히 방전되어 있어 충전모드 시 입력과 슈퍼커패시터, LDO가 직렬로 연결되는 SCALDO 레귤레이터 특성 상 입력전압이 LDO에 짧은 시간동안 그대로 인가되는데, 입력전압이 출력전압보다 최소 2배 이상 크기 때문에 이는 LDO에 상당히 큰 부담이 될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 과전압 문제를 해소하기 위해 회로 동작 전 슈퍼커패시터를 충전시킬 수 있는 사전충전부가 포함된 새로운 SCALDO 레귤레이터를 제안하였으며, 실험을 통해 동작 초기 LDO에 인가되는 과전압이 상당부분 감소됨을 확인하였다.

Key words : SCALDO, LDO, Supercapacitor, Pre-charger, Regulator, DC-DC converter

* LIG Nex1 Co., Ltd

★ Corresponding author

Email: osoon.kwon@lignex1.com, Tel: 053-8026-4144

Manuscript received Aug. 10, 2016; revised Sep. 05, 2016 ;
accepted Sep. 14, 2016

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.

1. 서론

LDO는 DC(Direct Current) 전압에서 그보다 작은 크기의 DC 전압으로 전압강하를 할 때 사용되는 전원회로로, 사용이 간편하고 출력특성이 매우 뛰어나 다양한 전자기기에서 사용되고 있는 매우 우수한 전원회로이다.[1]

하지만, LDO는 동작 시 입력전압과 출력전압의

차이로 인한 전력이 레귤레이터 내부에서 단순히 열로 소모되어 버리는 단점이 있으며, 특히 전압강하 정도가 크거나 출력전류가 클수록 이러한 전력의 소모가 커져 전력변환 효율이 굉장히 낮아지게 된다.[2]-[7]

최근 이러한 LDO의 낮은 효율문제를 보완하기 위한 방안으로 SCALDO 레귤레이터가 연구되고 있다. SCALDO 레귤레이터는 정전용량이 매우 큰 슈퍼커패시터를 LDO의 입력 단에 부착하여 전압강하 시 발생하는 전력손실을 최소화하기 위한 회로로, 입력전압과 출력전압 간의 차이에 의해 LDO 내부에서 소모되는 전력을 슈퍼커패시터에 저장하였다가 재사용함으로써 전력변환효율을 향상시키는 회로이다.[9]-[12]

또한 구동 시 수백 KHz이상의 고속 스위칭이 요구되는 SMPS(Switch Mode Power Supply)와 달리 수 F'이상의 매우 큰 정전용량을 가지는 슈퍼커패시터를 이용함으로써 회로 구동을 위한 스위칭 속도가 '수십 mHz ~ 수 Hz'로 매우 낮아 EMI(Electro Magnetic Interference)에서 주로 문제가 되는 고주파 노이즈의 발생을 억제할 수 있다.[3]-[9]

하지만, SCALDO 레귤레이터는 현재 연구가 진행 중인 회로로 아직 개선해야 할 사항들이 남아 있으며, 그 중 하나는 SCALDO 레귤레이터가 구동을 시작할 때 슈퍼커패시터가 완전히 방전되어 있는 상태이며 회로구동 전 슈퍼커패시터를 충전할 수 있는 수단이 없다는 것이다.

즉, 회로의 구동 초기 충전모드로 동작을 시작할 때 슈퍼커패시터가 완전히 방전되어 있을 경우 슈퍼커패시터와 LDO가 직렬로 연결되어있는 구조로 인해 LDO에 입력전압과 같은 크기의 과전압이 인가되어 스트레스를 주게 되며, 이로 인해 불필요하게 높은 내압조건을 가지는 LDO가 요구되는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 SCALDO 레귤레이터의 구동 시 슈퍼커패시터를 사전충전 할 수 있는 사전충전부 및 사전충전모드를 추가함으로써 회로 동작 초기 LDO에 인가되는 과전압을 방지할 수 있는 방안을 제시하였고, 실험을 통해 실현가능성을 입증하였다.

II. 본론

1. 기존회로의 구성 및 동작원리

기존 SCALDO 레귤레이터의 구성은 그림 1과 같이 슈퍼커패시터, LDO, LDO 입력 커패시터, 스위칭 소자 3개, 다이오드, 컨트롤러(T-Flipflop, 비교기)로 구성되며, 회로 내 슈퍼커패시터의 동작 상태에 따라 2가지 모드로 작동한다.[9]

즉, 최초 입력전원이 인가되면 슈퍼커패시터를 충전시키면서 LDO로 전력을 전달하는 충전모드로 동작하며, 이후, 슈퍼커패시터가 자체적으로 LDO를 동작할 수 있을 정도로 충전되면 회로의 입력전원을 끊고 슈퍼커패시터에 저장된 전력으로 LDO를 구동시키는 방전모드로 동작한다. 방전모드 동작 중 슈퍼커패시터가 LDO를 구동할 수 없을 만큼 방전되면 다시 충전모드로 돌아가 동작하는 방식으로 충전/방전모드를 번갈아 수행하면서 부하에 안정적으로 전원을 공급한다.[9]

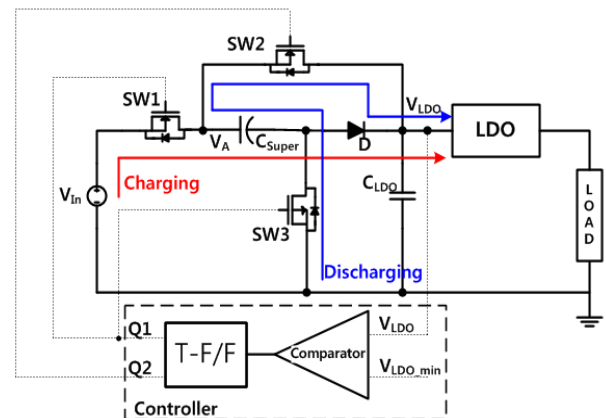


Fig. 1. A conventional SCALDO regulator

그림 1. 기존 SCALDO 레귤레이터

기존 SCALDO 레귤레이터의 동작원리를 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다.

먼저 충전모드는 그림1의 적색라인과 같이 SW1이 On되고 SW2와 SW3이 Off됨으로써 수행되며, 입력전원 V_{in} 과 슈퍼커패시터, LDO가 직렬로 연결되어 슈퍼커패시터의 충전과 LDO로의 전력전달이 동시에 이루어진다. 이때, 직렬연결로 인해 LDO의 입력전압 V_{LDO} 는 슈퍼커패시터의 양단전압 V_C 가 상승되는 만큼 감소하며, 그 값이 LDO의 최소구동전압 V_{LDO_min} 까지 감소하면 컨트롤러에 의한 스위칭동작으로 회로가 방전모드로

전환된다.[9]

방전모드는 그림 1의 청색라인과 같이 SW1이 Off되고 SW2와 SW3이 On됨으로써 수행되며, 입력전원 V_{in} 이 분리되고 슈퍼커패시터와 LDO가 병렬로 연결되어 슈퍼커패시터에 저장된 에너지에 의해 LDO가 동작한다. 이때, 슈퍼커패시터가 LDO로 전력을 전달하기 때문에 슈퍼커패시터에 충전된 전압 V_C 는 시간이 지남에 따라 감소하게 되며, V_{LDO_min} 까지 감소하면 다시 충전모드로 동작한다.[9]

위의 설명과 같이 충전모드와 방전모드를 반복적으로 수행하며 동작되는 SCALDO 레귤레이터는 LDO의 전압강하 시 입력전압과 출력전압 차이에 의해 불필요하게 소모되는 전력을 저장 및 재사용함으로써 회로의 전력변환 효율을 향상시킬 수 있다.

2. 기존회로의 취약점 및 보완방법

기존 SCALDO 레귤레이터는 충전모드와 방전모드의 두 가지 모드로 운용되며, 두 가지 모드 모두에서 회로 출력단의 LDO로 안정적인 전력공급이 가능해야 한다. 특히, 입력전원이 차단되고 슈퍼커패시터에 저장된 전력만으로 LDO를 동작 시켜야 하는 방전모드를 수행하기 위해서는 직전의 충전모드에서 슈퍼커패시터를 충분히 충전할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 슈퍼커패시터를 충전함과 동시에 LDO를 동작 시켜야하는 충전모드의 특성상 출력전압의 최소 2배 이상의 입력전압이 요구된다.

이러한 입력과 출력간의 큰 전압차이는 회로의 최초동작 시 LDO에 불필요한 과전압을 발생시키며, 이는 슈퍼커패시터가 완전 방전되어 있는 상태이기 때문이다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 충전모드 시 SCALDO 레귤레이터는 입력전압과 슈퍼커패시터, LDO가 직렬로 연결되어 동작한다. 따라서, 회로의 최초 동작 시 슈퍼커패시터가 완전 방전되어 있는 상태이므로 회로는 충전모드로 동작을 시작하게 되고 이로 인해 그림 2 와 같이 LDO에 입력전압이 그대로 인가되게 된다.

따라서, LDO는 회로를 켤 때 마다 불필요한 과전압을 인가받게 되고, 이러한 과전압을 견딜 수

있도록 보다 높은 내압 조건을 가져야 한다.

특히, 회로의 출력전압이 크거나 출력전류가 작을 경우 문제는 더욱 심각해진다. 이는 출력전압이 클 경우 이에 비례하여 입력전압 또한 커지게 되므로 동작초기 LDO에 가해지는 과전압이 커지게 되고, 출력전류가 작을 경우 식 1에서 알 수 있듯이 슈퍼커패시터의 충전 시간이 길어져 과전압의 지속시간이 길어지기 때문이다.[13]

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(\tau) d\tau + v_C(t_0) \tag{1}$$

그림 2는 기존 SCALDO 레귤레이터의 주요 파형을 나타내는 그림으로 V_{LDO} , V_A , V_C 는 각각 LDO 입력전압, 슈퍼커패시터 입력전압, 슈퍼커패시터 충전전압을 나타내며 이를 통해 회로 내 슈퍼커패시터의 충/방전과정과 최초 동작 시 LDO 입력 단에 과전압이 인과 되는 원인을 알 수 있다.

본 논문에서는 SCALDO 레귤레이터의 최초 충전모드 시 LDO에 인가되는 과전압을 방지하기 위해 회로의 동작 전에 슈퍼커패시터에 일정량의 전력을 충전할 수 있는 사전충전모드를 추가하는 방안을 제시하였다. 또한, 이를 구현위해 기존회로에 하드웨어적으로 사전충전부를 추가하였고, 사전충전모드가 포함된 3가지 동작모드가(사전충전모드, 충전모드, 방전모드) 원활히 동작될 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

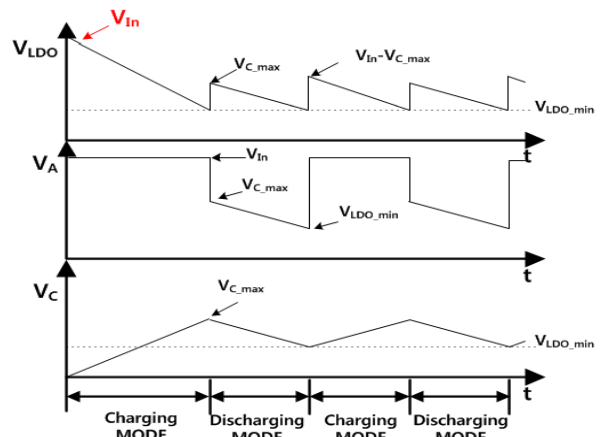


Fig. 2. Major waveforms of the conventional SCALDO regulator

그림 2. 기존 SCALDO 레귤레이터의 주요파형

3. 제안회로의 구성 및 동작원리

본 논문에서 제안하는 SCALDO 레귤레이터는 그림 3과 같으며, 회로 내 슈퍼커패시터를 최초의 충전모드 동작 전에 충전하여 LDO에 인가되는 과전압이 발생하지 않도록 방지한 회로이다.

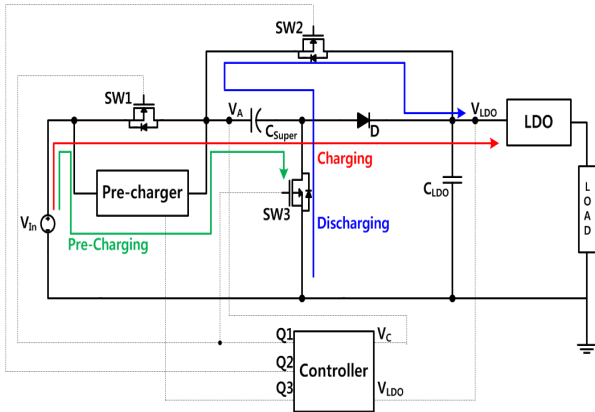


Fig. 3. A proposed SCALDO regulator
그림 3. 제안된 SCALDO 레귤레이터

회로 내부의 사전충전부는 그림 4와 같이 스위치 소자 2개와 저항으로 이루어진 전압분배기로 구성되며, P-MOSFET(P-type Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor)의 게이트에 연결된 전압분배기의 출력전압을 조정함으로써 입력 전압이 사전충전부 출력 단(V_A)에 연결된 슈퍼커패시터를 충전할 수 있게 하는 회로이다. 또한, 컨트롤 신호 Q3를 이용하여 N-MOSFET(N-type Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor)를 ON/Off함에 따라 사전충전모드를 제외한 모드에서는 동작을 정지할 수 있으며, 전압분배기의 저항 값을 조종하여 V_{P_con} 을 변경함으로써 슈퍼커패시터가 사전충전 되는 시간을 조정할 수 있다. 이는 소스 전압 대비 게이트 전압이 문턱전압만큼 낮아질 때부터 소스로 부터 드레인으로 전류가 흐르기 시작하여 전압차이가 커질 수록 흐르는 전류의 크기가 커지는 P-MOSFET의 특성을 이용한 것이다.[14]

앞에서 설명한 사전충전부를 포함한 제안된 SCALDO 레귤레이터의 동작모드는 사전충전모드, 충전모드, 방전모드로 구성되며, 각각의 모드에 대한 동작은 그림 3의 녹색, 적색, 청색 라인과 같고 이러한 모드들의 동작을 위한 알고리즘

은 그림 5와 같다.

먼저 회로를 켜면 제어신호 Q1과 Q3가 High, Q2가 LOW로 설정되어, SW1이 OFF, SW2와 SW3이 On, 사전충전부가 ON된다. 이때, 슈퍼커패시터에 사전충전되는 최대전압 V_{Pre} 값을 LDO를 구동시키기 위한 최소전압 V_{LDO_min} 보다 낮게 설정하여 SW2를 통해 LDO로 흐르는 전류의 흐름을 최소화함으로써 그림 3의 녹색라인과 같은 경로로 슈퍼커패시터가 충전되게 한다. 이후 슈퍼커패시터가 충전되어 V_{Pre} 값에 도달하면 제어신호 Q3이 Off되어 사전충전부의 동작이 정지되고, Q1과 Q2의 상태가 반전되어 다음 모드인 충전모드가 실행된다.

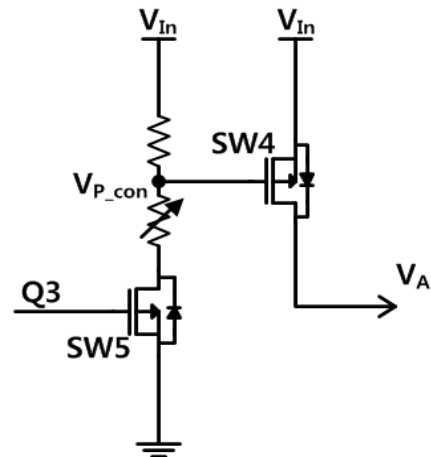


Fig. 4. A Pre-charger circuit
그림 4. 사전충전부 회로도

충전모드는 사전충전부, SW2, SW3이 Off 되고, SW1이 On되면서 슈퍼커패시터가 입력전원 및 LDO와 직렬로 연결되어 그림 3의 적색라인과 같이 동작한다. 즉, 입력전원에 의해 슈퍼커패시터의 충전과 LDO로의 전력공급이 동시에 이루어지게 된다. 이때, 사전충전모드에서 슈퍼커패시터가 V_{Pre} 만큼 충전되었으므로 LDO 입력전압 V_{LDO} 의 초기전압은 $V_{In} - V_{Pre}$ 가 되고, 슈퍼커패시터가 충전됨에 따라 감소하다가 LDO의 최소구동전압 V_{LDO_min} 까지 감소하면 Q1과 Q2를 반전시켜 방전모드로 전환된다.

방전모드는 사전충전부와 SW1이 Off되고 SW2와 SW3이 On되어 슈퍼커패시터가 입력전원과 분리되고 LDO와 병렬로 연결되어 그림 3의 청색

라인과 같이 동작한다. 즉, 슈퍼커패시터에 저장된 전력이 LDO로 전달되면서 방전하게 되고, 이로 인해 LDO의 입력전압 V_{LDO} 가 감소하다가 V_{LDO_min} 까지 감소하면 Q1과 Q2를 다시 반전시켜 충전모드로 돌아간다. 이후 SCALDO 레귤레이터는 슈퍼커패시터의 충/방전 상태에 따라 충전모드와 방전모드를 반복수행하면서 동작하게 된다.

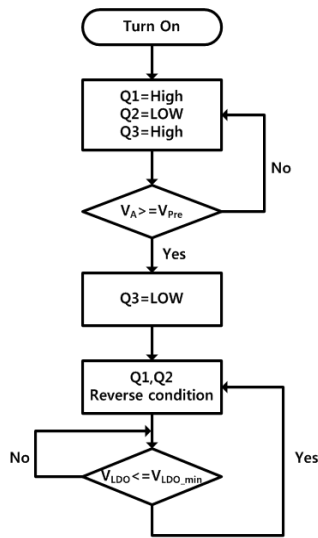


Fig. 5. Operating algorithm of a proposed SCALDO regulator

그림 5. 제안된 SCALDO 레귤레이터의 동작 알고리즘

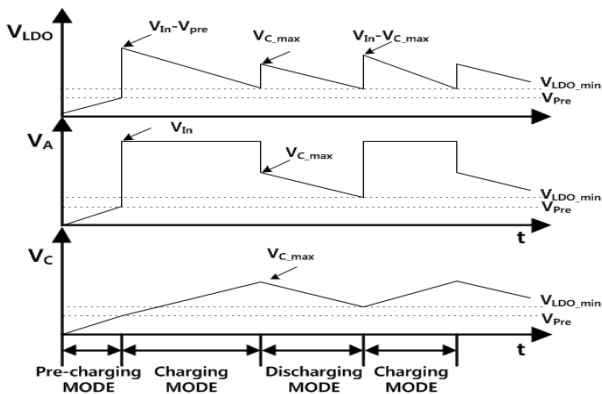


Fig. 6. Major waveforms of the proposed SCALDO regulator

그림 6. 제안된 SCALDO 레귤레이터의 주요파형

위의 회로동작과정을 보다 쉽게 이해하기 위해 제안된 SCALDO 레귤레이터의 주요파형을 그림 6에 표시하였으며, 그림 6을 통해 V_{LDO} 초기값이 기존 SCALDO 레귤레이터의 V_{LDO} 초기 값인 V_{IN}

대비 V_{Pre} 만큼 감소되어 초기 과전압을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

그림 6의 V_{LDO} , V_{LDO_min} , V_A , V_C , V_{C_max} , V_{IN} , V_{Pre} 는 각각 LDO 입력전압, LDO 최소구동전압, 슈퍼커패시터 입력전압, 슈퍼커패시터 충전전압, 슈퍼커패시터 충전전압의 최대값, 입력전압, 슈퍼커패시터 사전충전전압을 의미한다.

4. 실험방법

본 실험에서는 제안된 SCALDO 레귤레이터가 최초 충전모드 동작 시 회로 내 LDO의 입력 단에 발생하는 과전압을 방지할 수 있다는 것을 확인하기 위해 최초 충전모드에서의 동작특성을 기존 SCALDO 레귤레이터와 비교하였으며, 자세한 시험조건은 표 1과 같고 시험에 사용된 구성품 사양은 표 2와 같다.

Table 1. Operating conditions of the proposed SCALDO regulator

표 1. 제안된 SCALDO 레귤레이터 구동조건

Conditions	Value
V_{IN}	5V
V_{OUT}	2V
I_{OUT}	300mA
V_{LDO_min}	2.2V
V_{Pre}	2V

Table 2. Specifications of parts for the proposed SCALDO regulator

표 2. 제안된 SCALDO 레귤레이터의 구성품 사양

Conditions	Value
LDO	TPS74201 Texas Instruments, Inc
Controller	PIC16F684 Microchip Technology, Inc
SW1,SW2,SW4	P_MOSFET, BSO080P03NS3E_G Infineon Technologies AG
SW3,SW5	N_MOSFET, BUK625R0-40C NXP Semiconductors
D	Schottky Rectifier, 20L15TPBF Vishay Semiconductors
C_{Super}	Supercapacitor, 1.5F, 2.5V Cooper Bussman
C_{LDO}	Electroly Capacitor, 100uF, 50V Samyoung Electronics

4. 실험결과

그림 7과 그림 8은 제안된 SCALDO 레귤레이터의 사전충전모드 와 충/방전모드의 슈퍼커패시터 입력전압(V_A), LDO 입력전압(V_{LDO}) 및 제어신호 Q1, Q2, Q3를 측정한 파형이다. 그림 7의 파형을 통해 회로가 동작을 시작하면 제어신호 Q1, Q2, Q3가 각각 High, LOW, High로 설정되어 사전충전모드가 수행되고, 슈퍼커패시터 입력전압 V_A 가 Controller에 설정된 사전충전전압 V_{Pre} 보다 높아지면 Q3가 LOW로 변경되어 사전충전부를 Off하고 Q1과 Q2의 상태가 반전되어 안정적으로 충/방전 모드로 동작이 전환됨을 알 수 있다.

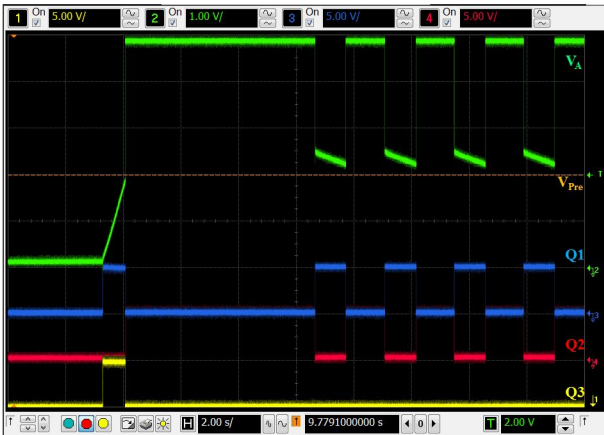


Fig. 7. Supercapacitor input voltage and Control Signals(5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

그림 7. 슈퍼커패시터 입력전압 및 제어신호(5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

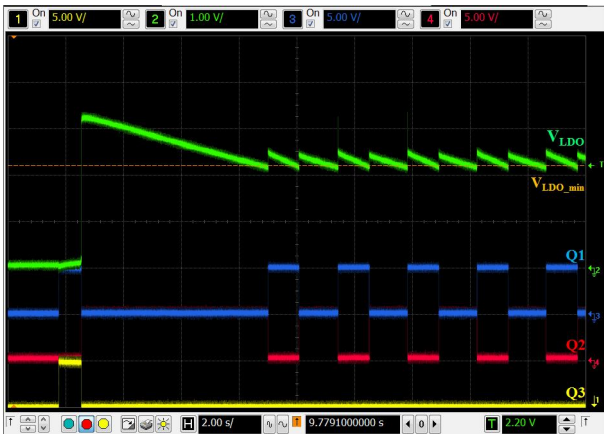


Fig. 8. LDO input voltage for operating LDO and Control Signals(5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

그림 8. LDO 입력전압 및 제어신호(5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

그림 8은 LDO의 입력전압 V_{LDO} 와 제어신호 Q1, Q2, Q3의 파형을 나타내며, 충/방전모드에서 V_{LDO} 가 V_{LDO_min} 까지 낮아 질 때 마다 Q1과 Q2의 상태가 반전되면서 안정적으로 슈퍼커패시터의 충전 및 방전이 동작되는 것을 확인할 수 있다.

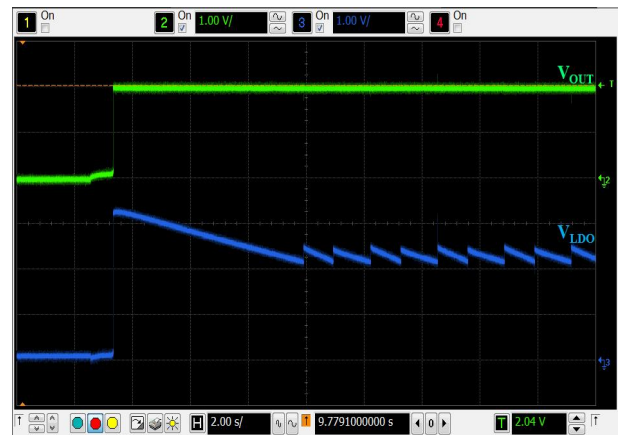


Fig. 9. Output voltage and LDO input voltage of a proposed SCALDO regulator (5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

그림 9. 제안된 SCALDO 레귤레이터의 출력전압 및 LDO 입력전압 (5V to 2V, $I_{out}=300mA$)



Fig. 10. LDO input voltage of a conventional SCALDO regulator (5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

그림 10. 기존 SCALDO 레귤레이터의 LDO 입력전압 (5V to 2V, $I_{out}=300mA$)

그림 9는 제안된 SCALDO 레귤레이터의 출력 파형 V_{OUT} 와 LDO의 입력전압 V_{LDO} 를 나타내며, 회로가 LDO에 충분한 전력을 공급해 줄 수 있는 충/방전 모드를 진행할 때부터 매우 안정적인 출력전압을 발생시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 그림 7 - 9를 통해 제안된 SCALDO 레귤레이터가 사전충전모드 및 충/방전모드에서 안정적으로 동작되며, 출력특성 또한 매우 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

또한, 그림 8과 그림 10을 통해 제안된 SCALDO 레귤레이터가 기존 SCALDO 레귤레이터에서 발생하는 LDO 입력 부 과전압을 억제하여 초기동작 특성이 개선된 것을 확인할 수 있다. 그림 10의 기존 SCALDO 레귤레이터의 V_{LDO} 의 초기 값이 입력전압과 유사한 4.7V로 과전압이 인가된 것과는 달리 그림 8의 제안된 SCALDO 레귤레이터의 V_{LDO} 는 최대값이 3.3V로 사전충전된 슈퍼커패시터 전압에 의해 상당히 낮아 졌음을 확인할 수 있으며, 이를 통해 SCALDO 레귤레이터의 초기 과전압인가 현상이 개선된 것을 확인할 수 있다.

III 결론

본 논문에서는 기존 SCALDO 레귤레이터의 초기 동작 시 발생하는 LDO 입력 단의 과전압을 해소하기 위해 사전충전부가 추가된 SCALDO 레귤레이터를 제안하였다.

이를 구현하기 위해 회로가 동작하기 전에 슈퍼커패시터를 충전할 수 있는 사전충전부를 제안하였고 이를 구동하기 위한 사전충전 모드가 기존 충/방전모드와 연결되어 잘 동작할 수 있도록 새로운 구동 알고리즘을 제시하였다.

또한, 5V to 2V의 입출력 조건을 갖는 SCALDO 레귤레이터를 제작하여 성능을 확인한 결과 기존 SCALDO 레귤레이터에서는 입력전압 5V와 거의 유사한 4.7V의 과전압이 인가된 것과는 달리 제안된 SCALDO 레귤레이터에서는 3.3V로 과전압 현상이 상당히 개선된 것을 확인 하였다.

따라서, 본 논문에서 제안한 사전충전부를 포함한 SCALDO 레귤레이터는 초기 과전압문제를 해소하여 기존 SCALDO 레귤레이터에 비해 보다 안정적으로 구동될 수 있으며, 입출력 차이가 큰 전력변환 시 보다 낮은 사양의 LDO를 사용하여 회로를 구현 할 수 있어 보다 경제적으로 회로를 구성할 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

References

- [1] Jun-Soo Park, Dae-Yeol Yoo, Bo-Bae Song, Jun-Mo Jung, Yong-Seo Koo, "Small area LDO Regulator with pass transistor using body-driven technique," *Journal of Institute of Korea Electrical And Electronics Engineers* Vol 17, No 2, pp. 214-220, June, 2013
- [2] Huei-Sheng Jhuang, Jia-Hui Wang, Zi-Yu Zeng and Chien-Hung Tsai, "A Low Dropout Linear Regulator with High Power Supply Rejection," *IEEE ISIC 2009 12th*, pp. 41-44, Dec, 2009.
- [3] Yi-Ting Lee, Chia-Ling Wei and Chin-Hong Chen, "An Integrated Step-Down DC-DC Converter with Low Output Voltage Ripple," *IEEE ICIEA 2010 5th*, pp. 1373-1378, June, 2010.
- [4] Z.-H.Shen and H.Min, "Combination method of DC-DC converter and LDO to improve efficiency and load regulation," *IET Electronics Letters*, Vol 47, No 10, pp. 615-617, May, 2011.
- [5] TI Application Report, "AN-556 Introduction to Power Supplies," Texas Instruments Incorporated, May, 2004.
- [6] Jun-Soo Park, Bo-Bae Song, Dae-Yeol Yoo, Joo-Young Lee, Yong-Seo Koo, "A Design of Peak Current-mode DC-DC Buck Converter with ESD Protection Devices," *Journal of Institute of Korea Electrical And Electronics Engineers* Vol 17, No 1, pp. 77-82, March, 2013
- [7] Jae-Jin Yeo, Jeong-Jin Roh, "A Capacitorless Low-Dropout Regulator With Enhanced Response Time," *Journal of Institute of Korea Electrical And Electronics Engineers* Vol 19, No 4, pp. 506-513, Dec, 2015
- [8] S.M.M.Mirtalaei, S.H.H.Sadeghi and R.Moini, "Radiated Emission Determination from Near Field Measurements for EMI Evaluation of Switch Mode Power Supplies Components by Method of Moments," *IEEE PEDSTC 2013 4th*, pp. 421-425, Feb, 2013.

- [9] O-Soon Kwon, Joon-Bae Son, Tea-Rim Kim, Jong-Gyu Song, "Implementation of a High Efficiency SCALDO Regulator Using MOSFET," *Journal of Institute of Korea Electrical And Electronics Engineers* Vol 19, No 3, pp. 304-310, Sept, 2015
- [10] Nihal Kularatna and Jayathu Fernando, "A Supercapacitor Technique for Efficiency Improvement in Linear Regulators," *IEEE IECON 2009 35th*, pp. 132-135, Nov, 2009.
- [11] Kosala Kankanamge and Nihal Kularatna, "Improving the End-to-End Efficiency of DC-DC Converters Based on a Supercapacitor-Assisted Low-Dropout Regulator Technique," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol 61, No 1, pp. 223-230, Jan, 2014.
- [12] Kalpani Kosala Gunawardane, "Analysis on Supercapacitor Assisted Low Dropout (SCALDO) Regulators," PhD Thesis, University of Waikato, 2014.
- [13] Eui-Cheol Nho, Gyu-Bum Joung, Nam-Sup Choi, "*Power Electronics*," chap 2, MUNUNDANG, Seoul, Feb, 2011.
- [14] Infineon Technologies AG, "OptiMOSTM 3 P3-Power-Transistor," BSO080P03NS3E G datasheet of Infineon, May, 2010.

BIOGRAPHY

O-Soon Kwon (Member)

2010 : BS degree in Electronic Engineering, Yeungnam University.
 2012 : MS degree in Electronic Engineering, Yeungnam University.
 2013~Current : Research Engineer
 PGM System Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.

Joon-Bae Son (Member)

2010 : BS degree in Electronic Engineering, Donga university
 2012 : MS degree in Robotics, Busan national university
 2012~Current : Research Engineer
 PGM System Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.

Jong-Gyu Song (Member)

2011 : BS degree in Electronics & Communication Engineering, Hanyang University.
 2013~Current : Research Engineer
 PGM System Lab, LIG Nex1 Co., Ltd.