

# 돌입전류 제한회로 개선을 통한 전원변환장치 운용신뢰성 향상

윤재복\*, 류서현  
국방기술품질원 대구센터

## Operational Reliability Improvement of Power Converter by Improving the Inrush Current Limiter

Jae-Bok Yoon\*, Seo-Hyeon Ryu

The Daegu Center, Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 본 논문에서는 돌입전류로부터 전원변환장치를 보호하고 오동작을 예방하기 위해서 돌입전류 제한회로의 성능 향상 방법에 관해 서술하였다. 군용 레이더의 전원변환장치를 운용하던 도중 회로차단기가 간헐적으로 동작하여 장비운용에 불편함이 초래되었다. 돌입전류 제한회로의 출력 전류를 측정해 본 결과 간헐적으로 250A 이상 과전류가 발생하여 회로차단기가 동작하였다. 돌입전류 제한회로에 사용된 SCR(Silicon Controlled Rectifier) 분석, 돌입전류 제한회로의 동작원리 분석을 통해 의도치 않게 dv/dt triggering 방식으로 SCR이 도통되면서 과도한 전류가 발생한다는 것을 알 수 있었다, 분석한 원인을 바탕으로 SCR 양단에 급격한 전압 변화가 생기지 않도록 하고, SCR이 gate triggering 이외의 방식으로 도통 되어도 의도한 전류 이상으로 돌입전류가 발생하지 않도록 SCR 앞단에 저항이 위치 하도록 회로를 변경하여 순간적인 전압 변화를 방지하였다. 마지막으로 돌입전류 제한회로의 전류 측정을 통해 의도한 전류 이상으로 돌입전류가 발생하지 않음을 입증 하였고, 상위체계에 부착시험을 통해 체계 영향성을 확인 하였으며, 전원변환장치에 적용하여 1년 이상 야전에서 운용결과 회로차단기가 동작하는 경우가 발생하지 않았다.

**Abstract** This paper describes the performance improvement of an inrush current limiter to prevent damage or malfunctions in power converters due to the inrush current. When the power converter of military radar is operated, the circuit breaker of the power converter is often activated because the overcurrent flows through the circuit breaker of the power converter. Therefore, this study performed a cause analysis of the problem, which is a larger current flow than the intended current(250A). The operation principle of an inrush current limiter and SCR (Silicon Controlled Rectifier) used in the inrush current limiter was analyzed. As a result, the overcurrent flow through the circuit breaker was found to be due to dv/dt triggering of SCR. Based on cause analysis, this paper proposes a technique by adding the resistor in front of the SCR to prevent an unnecessary inrush current. Finally, the effectiveness of the improvement was verified by measuring the output current in the inrush current limiter. The power converter equipped with the improved inrush current limiter operated for more than 1 year without the circuit breaker of the power converter being activated.

**Keywords** : Inrush current, Inrush current limiter, Overcurrent, Power converter, Silicon Controlled Rectifier

### 1. 서론

AC/DC 전원변환장치는 교류전원을 입력받아 전파

정류하여 직류전원으로 변환한 후 각종 구성품에 전원을 공급하는 역할을 수행한다. 전원변환장치에는 안정적인 운용이 가능하도록 입/출력전원에 대한 과/저전압 보호

\*Corresponding Author : Jae-Bok Yoon(Defense Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-54-469-6526 email: jaebok@dtq.re.kr

Received July 8, 2016

Accepted October 7, 2016

Revised (1st September 30, 2016, 2nd October 6, 2016)

Published October 31, 2016

기능, 자체상태점검기능, 돌입전류제한기능 등을 가지고 있다. 여기서 돌입전류 제한회로는 전자 장비를 처음 동작시킬 때 순간적으로 과다하게 흐르는 전류인 돌입전류로 인해 내부부품의 점진적인 손상, 회로차단기 작동 및 퓨즈가 끊어지는 현상을 예방하기 위한 회로이다[1]. 돌입전류는 주로 커패시터 입력형의 정류회로에서 주로 나타나며, 최초 전원 인가 시 커패시터의 매우 낮은 임피던스 상태로 인하여 순간적으로 높은 전류가 발생한다. 따라서 돌입전류를 막기 위해 인위적으로 임피던스 삽입을 통해 전류 최대치를 제한하는 방법을 이용한다. 임피던스 삽입의 가장 간단한 방법으로는 일반적인 저항소자가 있다. 저항의 추가로 인해 전체 회로의 임피던스가 높아지면서 전원을 켜는 때 순간적으로 과다하게 흐르는 전류를 막을 수 있으며, 저항이 클수록 돌입전류의 최대 값을 줄일 수 있다. 하지만 저항-커패시터 회로의 특성상 저항 값을 너무 높게 되면 문제가 발생할 수 있다. Fig 1은 저항-커패시터 직렬회로에서 시간에 따른 커패시터 충전/방전 전압을 나타낸 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 충전 속도는 시간이 흐름에 따라 점진적으로 느려진다는 것을 알 수 있으며, 저항의 값이 커질수록 커패시터의 충전 속도가 느려지는 현상이 발생하여 전원을 인가 후 각종 구성품에 전원 공급의 지연이 발생할 수 있다. 따라서 돌입전류 제한회로 설계 시 충전 속도와 전류 값을 동시에 고려해야 한다. 커패시터에 흐르는 전류는 전압의 변화량에 비례하고, 저항-커패시터 회로에서 충전 초기에 전압의 변화량이 크므로 저항을 크게 하여 충전 전압의 변화량을 줄여야 하며 일정 이상의 충전이 이루어진 후에는 충전 속도를 높이기 위해 저항을 줄여야 한다. 이를 실현시키기 위해 돌입전류 제한회로는 NTC(Negative thermistor)를 활용[2], 반도체 소자 활용(Silicon controlled Rectifier, MOSFET 등)[3][4]을 활용하여 개발되어 왔다. NTC는 온도에 따라 저항 값이 변하는 소자로 온도가 낮을 때는 저항 값이 높아지고 온도가 높을 때는 저항 값이 낮아지는 특성을 이용한다. SCR(Silicon Controlled Rectifier)은 제어신호에 의해 개방상태 또는 전류가 한 방향으로 흐르는 상태로 만들 수 있으며 이를 저항과 결합하여 저항 값을 조절할 수 있다.

군용레이더 전원변환장치의 돌입전류 제한회로를 SCR을 이용하여 개발하였으며, 장비를 운용하던 중 간헐적으로 과다한 돌입전류가 발생하여 회로차단기가 작

동하여 운용상 불편함을 주는 문제가 발생하였다. 따라서 본 논문에서는 위 현상에 대해 철저히 분석하고 해결 방안을 제시하여 SCR을 이용하는 돌입전류 제한회로 설계 시 발생할 수 있는 문제를 사전에 방지하는데 도움을 주고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 SCR을 이용한 돌입전류 제한회로에 대해 언급하고 발생한 문제점을 설명하고 발생 원인을 철저히 분석한다. 3장에서는 원인분석을 바탕으로 개선방법에 대해 기술하였고, 4장에서는 개선방법을 적용시켜 실험을 수행하고 그 결과에 대해 고찰하였다. 5장에서는 연구내용을 정리하고 기대 효과에 대해 기술하였다.

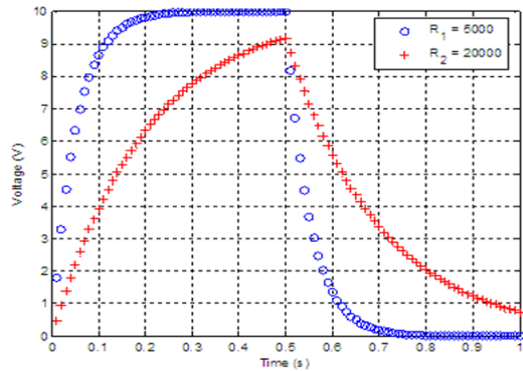


Fig. 1. Capacitor voltage in RC circuit

## 2. 돌입전류 제한회로 분석

### 2.1 SCR(Silicon Controlled rectifier)

돌입전류 제한회로를 설명하기에 앞서 회로에 사용된 SCR소자에 대해 먼저 간략하게 설명한다. SCR(Silicon Controlled Rectifier)는 이름에서 알 수 있듯이 Silicon은 반도체를 뜻하며, Controlled는 SCR이 동작하기 위해서 제어신호가 필요하다는 것을 뜻하며, Rectifier는 동작 시 정류다이오드와 같이 동작한다는 것을 뜻한다 [5]. Fig 2와 같이 SCR의 구조는 P-N 접합을 가지는 다이오드와 달리 P-N-P-N의 구조를 가지고 있으며, 외부 핀은 Anode, Cathode, Gate 3개의 핀을 가지고 있다.

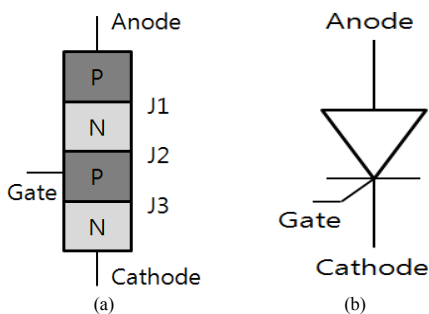


Fig. 2. Silicon Controlled Rectifier(SCR) structure and symbol  
(a) SCR structure (b) SCR symbol

SCR은 다이오드와 같이 단방향 소자이지만, 다이오드와 다른 점은 개방상태 및 정류다이오드 2가지 역할을 할 수 있다. SCR의 크게 3가지 동작모드가 있으며 전류-전압 곡선은 Fig 3과 같다. 여기서는 회로에 활용되는 2가지 모드에 대해서만 설명한다.

1) Forward blocking mode

이 모드는 anode, cathode 단자 사이에 양의전압을 인가하고 gate 단자에 0 전압을 인가한다. 이 경우 접합 J1, J3은 forward-biased, J2는 reverse-biased 상태가 되며, 아주 작은 누설전류만 발생하며 anode, cathode 단자 사이에 breakover 전압 이상을 인가하면 접합 J2가 항복이 일어나면서 전류가 흐르게 된다.

2) Forward conduction mode

이 모드로 동작하기 위해서는 여러 가지 방법이 있다. 여기에서는 가장 일반적으로 사용하는 gate triggering 방법을 설명한다. 우선 anode, cathode 사이에 양의 전압을 인가한다. 그 후 gate 단자에 양의 전압 펄스를 인가한다. SCR이 일단 도통되고 나면 더 이상의 gate 단자의 전압이 인가되지 않아도 도통 상태가 유지된다. 도통 상태를 중단시키는 방법으로는, 첫 번째로 도통전류가 holding 전류보다 작아지게 되는 경우, 두 번째로 anode, cathode 단자 사이를 스위치 등을 이용하여 단락시키는 방법이 있다.

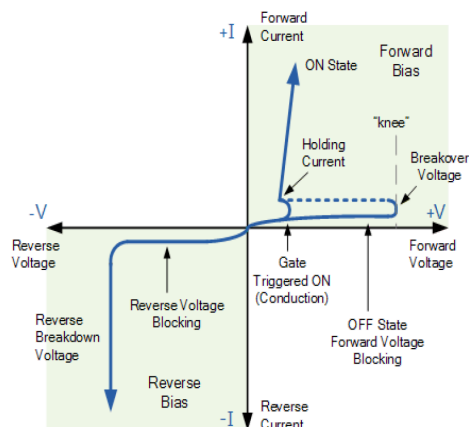


Fig. 3. SCR I-V curve

2.2 돌입전류 제한회로

전원변환장치의 돌입전류를 예방하기 위해 설계한 돌입전류제한회로는 Fig. 4과 같다. 회로의 동작은 크게 3단계로 이루어진다. 1) 전원변환장치에 전원이 인가되어 K1 3상 계전기가 ON되면 220VAC는 3상 전파정류를 통해 300VDC로 변환되어 7.5Ω(10Ω+5Ω 병렬연결) 저항을 통해 용량이 20,000μF인 커패시터를 충전시킨다. 이때 흐르는 전류는 RC 직렬회로 방정식을 풀면 아래의 수식 1와 같다.[6]

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-t/RC} \tag{1}$$

여기서 V는 전압, R은 저항, C는 커패시턴스, t는 시간을 의미한다. 수식 (1)을 살펴보면 초기에 약 40A의 전류가 흐르며 점진적으로 흐르는 전류가 감소하게 된다. 2) 커패시터 충전전압이 200V에 도달하게 되면 gate triggering 방식으로 SCR을 도통시키고 300V가 될 때까지 충전시킨다. SCR 양단에 100V의 전압이 인가되었을 때 약 150A의 전류가 흐른다. 3) 충전이 거의 완료된 후 0.6초 후에 K2 계전기를 ON시켜 전류가 K2 계전기를 통해 흐르도록 하고, K2 계전기 양단 전압은 수십 mV로 SCR은 도통 유지 전압을 상실하게 되어 개방상태가 된다. 이때는 전압이 낮아 수 A의 전류가 흐르게 된다. 설계한 회로의 전압과 전류를 측정할 그래프는 Fig 5와 같다. 초기에 40A의 정도의 전류가 흐르다가 점진적으로 흐르는 전류가 줄어든다. 그 후 SCR이 도통되게 되면 전류가 약 150A가 흐르게 되고, K2 계전기가 동작하게 되면 다시 수 A의 전류가 흐르고 전압은 300V가 되게 된다.

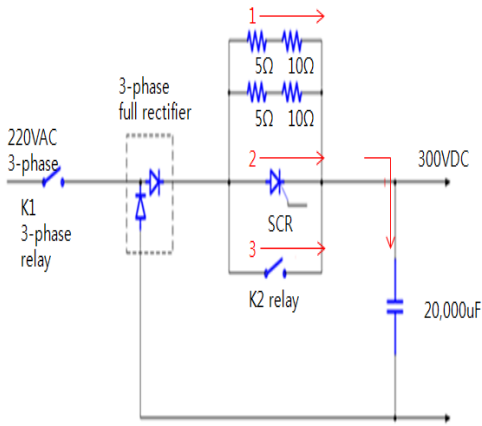


Fig. 4. Inrush current limiter circuit

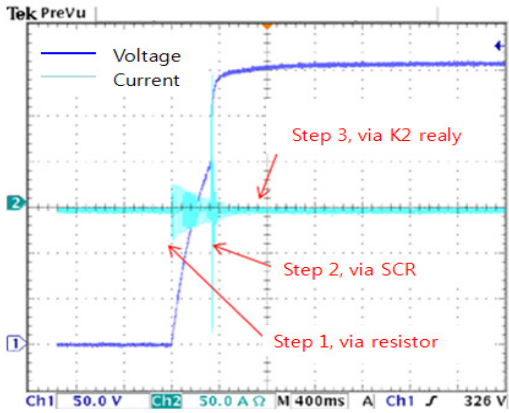


Fig. 5. Voltage and current graph in the output of inrush current limiter in case of normal operation

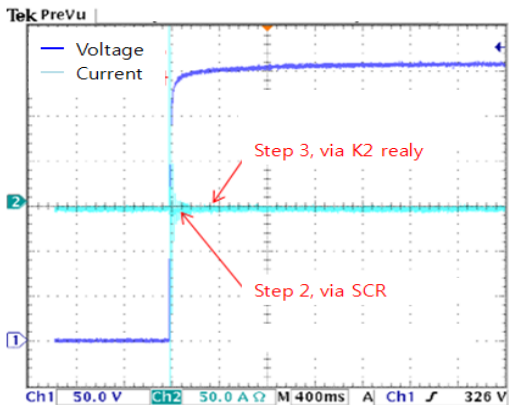


Fig. 6. Voltage and current graph in the output of inrush current limiter in case of malfunction

### 2.3 고장원인분석

전원변환장치에 돌입전류제한회로를 적용하여 장비를 운용하던 도중 간헐적으로 회로차단기가 내려가는 현상이 발생하였다. 고장이유를 파악하기 위하여 전원변환장치를 총 100회 ON/OFF를 실시하였다. 총 100회 중 Fig 6과 같이 2회의 돌입전류제한회로 오동작이 발생하였다. 오동작이 발생하였을 때 전압/전류 그래프를 살펴보면 정상동작할 때와는 달리 돌입전류제한회로의 첫 번째 동작단계인 저항을 통해 흐르는 경우가 생략이 되고 바로 SCR이 도통됨으로써 전류가 크게 흐른다는 것을 알 수 있다. 따라서 원래 의도한 gate triggering 방식이 외에 의도치 않게 SCR을 도통시키는 경우가 발생했다는 것을 알 수 있다. 추가적으로 어떤 조건에서 오동작이 발생하였는지 확인하기 위해 입력 220VAC 전원을 측정하면서 ON/OFF 시험을 해본 결과 입력 220VAC 전원이 최고값 일 때 전원변환장치가 ON이 되면 간헐적으로 오동작을 한다는 사실을 발견하였다. 따라서 gate triggering 방식 이외에 SCR에 인가되는 전압에 의한 triggering 방식에 대해 추가 조사를 실시하였다. 첫 번째로는 forward voltage triggering 방식으로 anode와 cathode 단자 사이에 breakover 전압이상의 전압이 인가되면 접합 J2에서 애벌런치 항복(avalanche breakdown)이 발생하여 도통이 발생한다. 설계 시 사용한 SCR 소자 부품번호는 MCD162-16101로 데이터시트를 살펴보면 breakover 전압 값이 1600V이므로 220VAC 전압 최고치 약 311V가 인가되더라도 SCR 도통 조건이 만족하지 않음을 알 수 있다. 두 번째로는 dv/dt triggering 방식으로 anode와 cathode 단자 사이의 전압변화가 급격하게 일어날 때 SCR이 도통되는 것이다. 원리는 anode와 cathode 단자 사이에 양의 전압이 인가되면 접합 J1, J3는 forward biased 상태가 되고 J2는 reverse biased 상태가 된다. 여기서 접합 J2에 전하가 축적되면서 커패시터의 역할을 하게 된다. anode와 cathode 양단의 전압을 V, 충전된 전하량을 Q, 커패시턴스를 C라고 하면 소자를 통해 흐르는 전류  $i_c$ 는 아래식 2와 같다.[6]

$$i_c = \frac{dQ}{dt}$$

$$Q = CV$$

$$i_c = \frac{d(CV)}{dt} = C \frac{dV}{dt} + V \frac{dC}{dt}$$

$$i_c = C \frac{dV}{dt} (\because \frac{dC}{dt} = 0) \quad (2)$$

따라서, 전압이 급격하게 변하면 전류의 흐름이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 데이터시트를 살펴보면 커패시턴스 값은 273pF이며 측정된 돌입전류는 261A로 dv/dt 값이 triggering 기준인 1000V/us 이상임을 알 수 있다. 따라서 dv/dt triggering 방식에 의해 SCR이 도통됨으로써 돌입전류제한회로가 오동작 했음을 알 수 있다.

### 3. 돌입전류 제한회로 개선

고장원인을 분석결과 전원변환장치를 켜는 때 SCR 양단의 전압이 급격하게 변화하여 도통이 되어 돌입전류 제한회로가 오동작 하였다. 따라서 돌입전류 제한회로를 개선하기 위해서 크게 두 가지 방향으로 진행하였다. 첫째, 전원변환장치를 동작 시킬 때 SCR 양단에 걸리는 전압이 급격하게 변화하지 않도록 보완하였다. 둘째, 만약 SCR이 gate triggering 방식이 아닌 다른 방식에 의해 도통되더라도 최대전류가 설계의도 값인 150A 이상이 흐르지 않도록 하였다.

최초 설계한 돌입전류 제한회로인 Fig 4를 살펴보면 SCR 양단에 저항이 없다는 것을 알 수 있다. 이로 인해 오동작하여 SCR이 도통되었을 때 저항이 없어 큰 전류가 흐를 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 SCR 양단에 걸리는 전압의 급격한 변화를 막고, 만약 SCR이 gate triggering 이외의 방식으로 도통되더라도 흐르는 전류의 양을 제한하기 위해 Fig 7과 같이 SCR 앞단에 저항을 추가하였다. 개선한 회로에 흐르는 전류값은 다음과 같다. 우선 SCR이 gate triggering 방식으로 의도한대로 동작했을 시에는 1단계에서의 전류는 수식 1에 따라 초기에 약 40A의 전류가 흐르다가 점진적으로 줄어들게 되고, 커패시터 충전전압이 약 200V가 되었을 때 SCR을 gate triggering 방식으로 도통시키게 되면 저항 5Ω 병렬 회로와 커패시터의 직렬회로가 구성되어 초기에 약 40A 전류가 흐르며 점진적으로 줄어들고, K2 계전기를 ON 시키면 수 A의 전류가 흐르게 된다. 만약 전원변환장치를 켜는 때 SCR이 gate triggering 방식 이외에 의도치 않게 도통되었을 때에도 저항 5Ω 병렬회로와 커패시터의 직렬회로가 구성되어 수식 (1)에 따라 초기에 약 120A의 전류가 흐르게 되고 점진적으로 전류가 줄어든다.

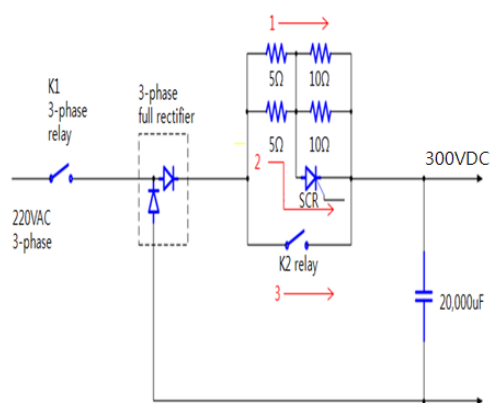


Fig. 7. Improved inrush current limit

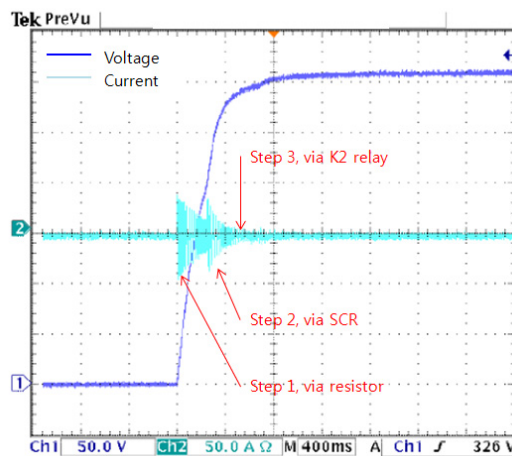


Fig. 8. Voltage and current graph in the output of improved inrush current limiter

### 4. 실험결과 및 고찰

개선한 돌입전류 제한회로를 검증하기 위해서 개선회로의 전류 값 측정을 실시하였다. 측정된 전류 값은 Fig 8과 같다. 개선방안에서 의도한 것과 같이 초기에 저항 5Ω 병렬회로를 통해 전류가 흐르면서 초기에 약 40A의 전류가 흐르다가 점진적으로 감소한다. 그리고 약 200V에서 SCR을 도통시키면 약 40A가 흐르다가 점차 감소하며, K2 계전기를 ON 시키면 수 A의 전류가 흐르게 된다. 또한 SCR 오동작 발생 가능성을 확인하기 위해 전원 ON/OFF를 100회 실시하였으나 SCR이 오동작하는 경우는 발생하지 않았다.

개선한 돌입전류 제한회로를 적용하여 균용레이더의

전원변환장치를 1년 이상 운용하면서 품질관리의 일환으로 지속적으로 모니터링을 실시하였으며 고장이력 분석결과 회로차단기가 동작하는 현상이 발생하지 않았다. 이로써 돌입전류 제한회로를 개선함으로써 전원변환장치 신뢰성 향상이 기대된다.

## 5. 결론

본 논문은 SCR(Silicon Controlled Rectifier)를 이용한 돌입전류 제한회로가 특정상황에서 오동작을 하는 현상에 대해 철저하게 원인을 분석하여 개선방안을 제시하였으며, 이러한 개선 방법을 적용하여 개선품의 검증시험 및 실제 장기간 운용을 통해 고장이 발생하지 않았음을 확인하였으며, 이를 통해 운용신뢰성 향상이 기대된다. 본 논문을 통해 SCR을 활용한 돌입전류 제한회로 설계 시 미리 발생가능한 문제점을 식별하고 대처를 하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

## References

- [1] R. W. Erickson, Fundamentals of Power Electronics, University of Colorado, Boulder, 1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-7646-4>
- [2] James, R. Del Signore II, Steven M., Spano, and Randolph Bullock. "Current inrush limiting circuit," U.S. Patent No. 7,019, 583. 28 Mar. 2006.
- [3] Reymond, Cedric, et al., "An Active Inrush Current Limiter Based on SCR Phase Shift Control for EV Charging Systems," Journal of Energy and Power Engineering 10, pp. 247-257, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17265/1934-8975/2016.04.006>
- [4] Mallesham, Gaddam, and Keerthi Anand., "Inrush current control of a DC/DC converter using MOSFET," Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES'06. International Conference on. IEEE, 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/pedes.2006.344412>
- [5] Ng, Kwok K., "Silicon Controlled Rectifier," Complete Guide to Semiconductor Devices, Second Edition : pp. 361-378, 2010.
- [6] Desoer, Charles A., Basic circuit theory, Tata McGraw-Hill Education, 2009.

윤재복(Jae-Bok Yoon)

[정회원]



- 2011년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (전자공학학사)
- 2013년 2월 : 광주과학기술원 의로시스템공학과(전자공학석사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>  
레이더, 신호처리

류서현(Seo-Hyeon Ryu)

[정회원]



- 2013년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (전자공학학사)
- 2015년 2월 : 한국과학기술원 공과대학원 전기 및 전자공학과(전기 및 전자공학석사)
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>  
레이더, 영상처리