

## 비정상 과도상태에서의 해군 전투체계 UPS 개선

김성후<sup>1</sup>, 최한고<sup>2</sup>

한화시스템 해양연구소<sup>1</sup>, 금오공과대학교 전자공학부<sup>2</sup>

### Improvement of Naval Combat System UPS under Abnormal Transients

Sung-Who Kim<sup>1</sup>, Han-Go Choi<sup>2</sup>

NAVAL R&D Center, Hanwha Systems<sup>1</sup>

Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology<sup>2</sup>

**요약** 본 논문에서는 비정상적인 과도상태에서의 개선된 해상 전투체계 UPS(Uninterruptable Power Supply) 시스템을 다룬다. 기존에는 일시적인 과전압 및 과전류에 대응하기 위하여 서미스터와 바리스터 소자를 사용하고 있지만 시스템 운용 중에 발생하는 비정상 과도전압에는 취약하므로 UPS가 비가용 상태로 되는 경우가 빈번히 발생하였다. 이를 극복하고 UPS 시스템을 보호하기 위하여 본 논문에서는 초기 입력전원 및 운용 중에 발생하는 비정상 과도전압을 감지한 입력 전원 차단회로, 전원제어 시퀀스 개선, 그리고 인버터 및 CPU 오동작 방지 방법 등을 제안한다. 제안된 방법으로 구현된 UPS 시스템은 Programmable AC/DC 발생기를 이용하여 입력전원 가변 시험을 통하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 최종적으로 해상 전투체계의 다기능콘솔에 장착하여 현장시험을 통하여 신뢰성과 안정성을 검증하였다.

• 주제어 : 무정전장치, 비정상 과도상태, 과전류, 과전압, 비접지 시스템

**Abstract** This paper addresses an improved naval combat UPS(Uninterruptable Power Supply) system under abnormal transients. Previously, thermistor and varistor elements were used to cope with transient overvoltage and overcurrent, however the UPS was frequently unavailable because it was vulnerable to abnormal transient voltage generated during system operation. In order to overcome this problem and protect UPS system, this paper proposes an input power cut-off circuit that detects the initial input power and abnormal transient voltage generated during operation, improvement of power control sequence, and a method to prevent malfunction of an inverter and CPU. The UPS system implementing the proposed method was simulated by input power variable test using programmable AC/DC generator, and finally validated its reliability and stability through field tests by mounting on multifunctional console of naval combat system.

• Key Words : UPS, Abnormal Transient, Overcurrent, Overvoltage, Ungrounded System

Received 23 August 2018, Revised 21 September 2018, Accepted 30 September 2018

\* Corresponding Author Han-Go Choi, Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61, Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk, Korea. E-mail: hgchoi@kumioh.ac.kr

## I. 서론

함정 전투체계는 대공전, 대함전, 대잠전, 전자전 등의 복합작전을 수행하기 위한 복합 무기체계로 구성되어 있었고 함정의 두뇌 역할을 수행한다. 따라서 함정 전투체계는 현대전에 없어서는 안 될 필수 무기체계이고 모든 해상 전투의 핵심체계로 자리하고 있다[1,2].

전투체계에 탑재되는 전자장비는 복합작전을 수행하기 위하여 고 신뢰성을 요구하고 있으며, 훈련 및 전시에 전자장비가 비가용 상태이거나 전술 데이터가 소멸되는 것을 방지하기 위하여 전압과 주파수 변동을 안정하게 조정하고 정전 시에도 일정 시간 전력을 계속 공급할 수 있게 무정전장치(UPS)를 기본적으로 탑재하고 있다.

군용 함정은 440V 3상 발전기를 사용하고 2차측 변압기의 델타 결선을 통하여 중성점 비접지 방식으로 전투체계 전자장비로 220V 단상 전압을 공급하고 있다.

함정에서 사용하는 델타 결선 방식은 제3고조파 전압이 나타나지 않아 유도장해 및 통신장해가 없다는 장점이 있으나, 중성점 비접지 방식은 상전압의 전압 변동과 전압 불평형이 발생하며 이는 단상부하의 데이터 손실, 기기오작동 등의 원인이 될 수 있다[3]. 또한, 함정 건조 공정과 더불어 전투체계 전자장비 개발 시험 중 발생하는 용접 작업, 글라인드 작업 및 타 장비의 고장 등에 의해 발생하는 비정상 과도 전압으로 인하여 전투체계 장비는 부품 소손과 고장 및 오동작 발생이 증가되고 있다.

이러한 함정 전원 시스템으로 인하여 비정상 과도전압이 무정전장치로 유입되어 전자장비를 보호해야 하는 무정전장치의 고장 및 이상 동작이 빈번하게 발생되고 있으며, 신뢰성을 확보해야 하는 전투체계장비의 비가용은 결국 개발 일정, 비용, 공수 등의 심각한 손실을 야기시킨다. 따라서 본 논문에서는 군용함정 전원 시스템의 문제점을 분석하고, 전투체계 무정전장치를 보호하기 위한 개선 방안을 제안하고 시뮬레이션 및 현장 시험을 통하여 제안된 방법을 검증하고자 한다.

## II. 군용함정 전원 시스템의 문제점

군용함정에서 중성점 비접지 전원 시스템[3-4]은 Fig. 1과 같이 전압선과 대지(선체)사이의 어떠한 접속도 없으나 전압선 상호간, 그리고 전압선-대지간의 정전 결합이 존재하는 전압선-대지간 정전용량(Capacitance)으로 접지된 시스템이다.

고장이 없는 건전한 상태에서는 안정된 3상 전압이 공급되며 각 상과 대지간의 용량성 충전전류(Capacitive charging current,  $I_{co}$ )의 크기가 같으나 1선 지락의 경우 지락발생 전압선의  $I_{co}$ 와 전압은 '0'이 되며 건전한 전압선의 경우는  $I_{co}$ 와 전압 모두 약 1.7배 상승한다. 또한 1선 지락 시 전압선-대지간에는 아크(Arc)가 발생하고 이 아크는 소멸과 재아크(Restrikes)를 반복한다. 지락된 전압선의 충전된 정전용량도 지락점을 통하여 대지로 방전된 후 다시 충전되는 반복현상이 발생한다.

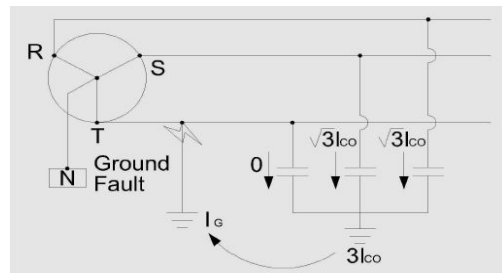


Fig. 1. Single line-to-ground fault on a neutral-point ungrounded system

이러한 현상은 건전한 상태의 전압선의 절연에 과도스트레스를 인가하여 다중 지락으로 파급될 수 있으며, 시스템의 유도성 리액턴스와 대지에 분포된 정전용량 사이의 공진발생으로 건전한 상간의 과전압 발생으로 높은 순환전류가 발생한다. 또한 1차 지락의 파급으로 인한 간헐아크지락 등의 발생으로 정상 상전압의 550%(드물게 700%)달하는 파괴적인 과도 과전압과 심각한 주파수변동이 200%까지 발생할 수 있으며 기기소손의 주요원이 될 수 있다. 이것이 중성점 비접지 시스템이 권고되지 않는 주요 이유이다[3-6].

3상 시스템에서 부하가 변동 할 경우 임피던스의 변화로 인하여 전류 및 전압의 불평형이 발생한다. 전압 불평형이 발생할 경우 전류 불평형으로 손실 증가는 물론 시스템의 동작을 불안정하게 한다. 그래서 중요한 설비에서는 전압의 불평형률을 1% 이내, 일반 설비에서도 1~3% 이내로 제한하고 있다[7,8].

### 2.1 PFC 모듈의 문제점

Fig. 2는 기존 UPS 블록도로서 함정에서 중성점 비 접지 전원 시스템에서 1선 지락 발생 시 비정상 과도 전압으로 인하여 UPS 내부의 PFC(Power Factor Correction) pack 소손이 발생하였다. 이 과정에서 AC 전원라인 단락이 발생하여 과전류로 인하여 인버터 모듈 소손을 야기하게 되었다.

PFC 모듈은 전원 감지회로를 통하여 UPS 제어모듈에서 전원상태를 감지하고 있으나, 비정상 과도전압 발생 시 내부 모듈을 보호하기 위한 HW 및 SW 차단 회로가 탑재되어 있지 않다.

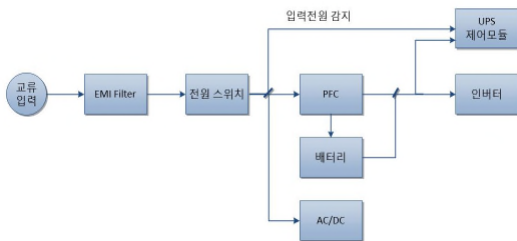


Fig. 2. Configuration of existing UPS

비정상 과도전압 발생 시 Fig. 3과 같이 UPS 입력 전압 파형은 100[V]~270[V]까지 입력 전원이 흔들리는 현상이 발생한다. 이때 Varistor, Thermistor 등의 소자를 통하여 UPS를 보호하나, 지속적인 과도전압에서는 보호소자의 한계치를 넘어 Fig. 4와 같이 소손되는 현상이 발생한다.

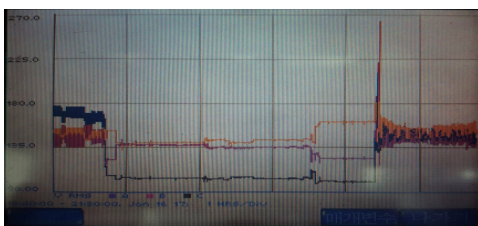


Fig. 3. Abnormal transient voltage waveform on naval combat system



Fig. 4. PFC pack and thermistor burnout due to 1-wire ground fault

비정상 과도전압으로 인하여 PFC Pack이 소손되고 내부회로 단락이 발생 될 때, 인버터는 short circuit 차단 전류(70[A])가 발생하여 Fig. 5처럼 인버터 내 IPM 소자가 소손되는 현상이 빈번하게 발생하였다.

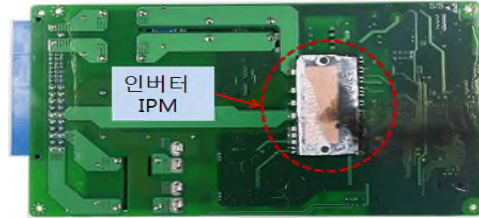


Fig. 5. IPM burnout in inverter module

### 2.2 인버터 모듈의 문제점

기존 인버터의 경우 Fig. 6과 같이 직류 380[V]로 구동되며, 내부 MCU 의 ADC 포트를 통하여 입력 전압/전류 및 출력 전압/전류를 감지한 후, Negative Feedback 방식의 PWM 제어를 통하여 출력을 공급하도록 설계되어 있다. 기존 인버터는 입출력 과전류가 발생시 MCU는 IPM 출력 차단명령을 수행한다.

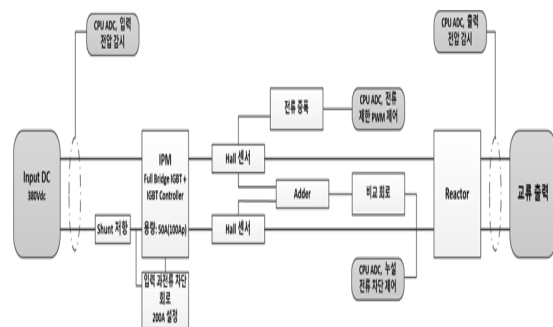


Fig. 6. Configuration of Existing inverter

인버터의 문제는 첫째, IPM 구동 MCU 고장 시 인버터 입/출력 제어 불가상황 발생으로 인한 UPS 내부 모듈 및 인버터 소손 유발 가능성이 존재한다. 둘째, MCU 의 ADC 포트를 통한 전압, 전류 측정과 IPM 제어 신호 지연으로 인하여 IPM 및 내부 수동소자 소손 유발 가능성이 발생한다.

## III. UPS 개선 방안

위에서 기술된 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서 선 PFC 모듈과 인버터 모듈 개선 방안을 제안하였다.

### 3.1 PFC 모듈 개선

비정상 과도전압에서 PFC 모듈의 소손을 방지하기 위하여 UPS 입력전압을 차단하여야 하므로 Fig. 7과 같이 UPS 전원스위치와 PFC모듈 사이에 SSR(무접점식 릴레이) 소자를 장착하고 UPS 제어모듈을 통하여 제어하였다.

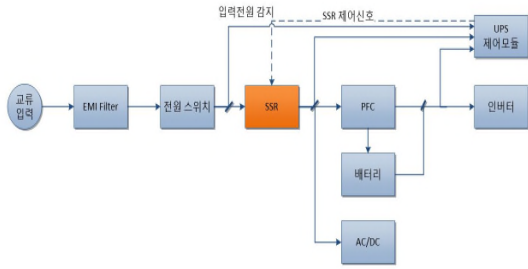


Fig. 7. Configuration of improved UPS with SSR

UPS 제어모듈은 입력전압이 165~275[Vrms] 범위를 벗어날 경우 SSR 제어로 입력전압을 차단하게 개선하였으며 입력전압이 순간적인 피크 전압 420[Vp-p] 이상일 경우에는 하드웨어적으로 SSR이 차단될 수 있게 설계하였다.

### 3.2 인버터 모듈 개선

PFC Pack의 소손으로 인하여 발생하는 과전류를 차단하기 위하여 Fig. 8과 같이 입력과전류 1차 제한회로 및 입력과전류 2차 차단회로를 추가하여 과전류 발생 시 과전류를 차단할 수 있는 회로를 추가하였다. 또한 출력전류 불평형 상태를 감시하기 위하여 H상과 N상 출력전류를 감지하고 누설전류 발생 시 출력 차단 신호를 생성하여 IPM 출력을 차단하는 회로를 추가하였다[9,10].

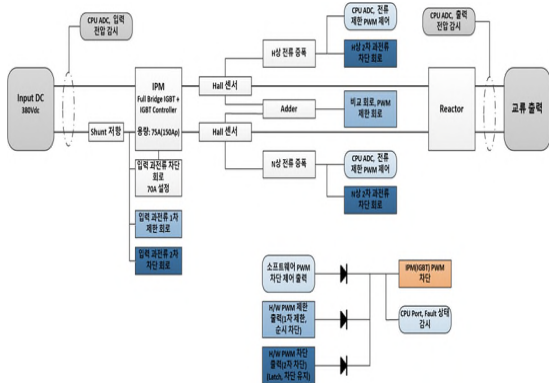


Fig. 8. Configuration of improved inverter

기존 인버터 모듈에 과전류 발생 시 MCU는 인버터 출력을 차단 명령을 수행하였으나, IPM은 소손되었다. 이 결과 인버터 출력을 MCU를 거쳐 SW로 제어는 한계가 있음을 확인하고 Fig. 9와 같이 기존 감지회로에 차단회로를 추가하여 과전류가 감지되면 하드웨어 차단 신호가 생성되고 즉각적으로 인버터 출력을 차단하게 개선하였다.

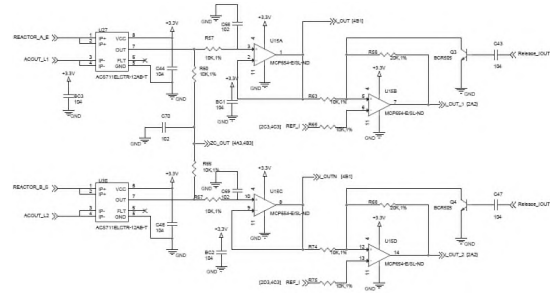


Fig. 9. Improved overcurrent sensing and reverse phase sensing circuit

과전류 감지 및 차단회로를 추가 한 인버터는 입력 전류, 출력전류, 출력전류 불평형 상태(누설전류)가 발생했을 때 인버터 출력을 자동으로 차단하게 된다.

## IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 4.1 PFC 모듈 실험 결과

제안된 PFC 모듈 동작을 검증하기 위하여 Fig. 10과 같이 UPS 입력에 저전압과 과전압을 인가하여 개선된 회로가 정상적으로 동작하는지 실험하였다.

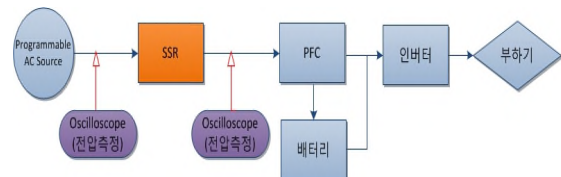


Fig. 10. PFC module experimental environment

#### 4.1.1 저전압 또는 과전압 발생 시 SSR 차단

Fig. 11과 Fig. 12는 저전압과 과전압 발생 시, 즉 합성에서 비정상 과도 전압이 발생 시 SSR이 입력을 차단됨을 보여주고 있다. 차단 구간은 165[V] 이하 및 275[V] 이상일 때 SSR은 입력을 차단하여 UPS를 보호한다.

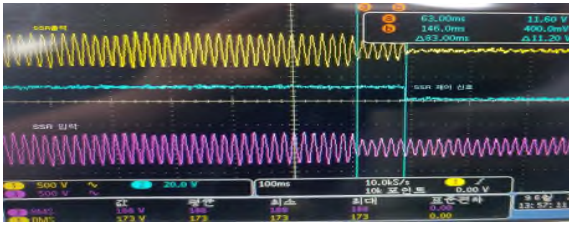


Fig. 11. SSR input cut-off waveform for low voltage input

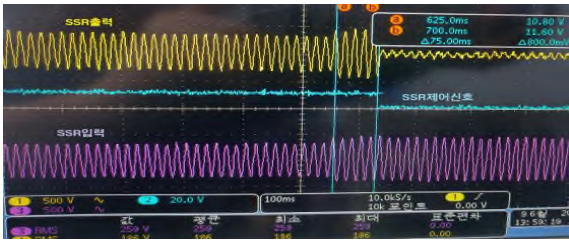


Fig. 12. SSR input cutoff waveform when overvoltage input

#### 4.2 인버터 모듈 실험 결과

개선된 인버터 동작을 검증하기 위하여 Fig. 13과 같이 구성하고 과전류 및 출력전류 불평형을 발생시켜 제안된 인버터 동작을 실험하였다.

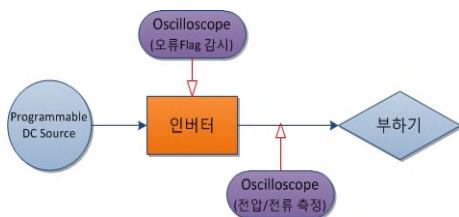


Fig. 13. Inverter module experimental environment

##### 4.2.1 과전류 발생 시 출력차단

인버터 입력에 과전류 발생 시 IPM 제어를 통하여 출력 억제 또는 차단됨을 실험하였다. Fig. 14는 전류가 25[A] 이상에서 출력과형이 억제되는 것을 볼 수 있고, Fig. 15는 출력전류가 35[A] 이상일 때 출력이 차단됨을 보여주고 있다.

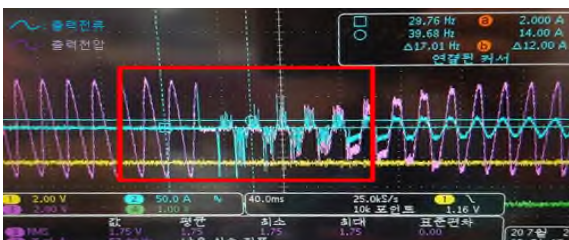


Fig. 14. Suppression of output waveform at 25[A] or more current

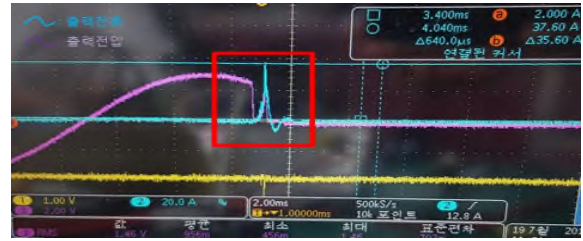


Fig. 15. Suppression of output waveform at 35[A] or more current

##### 4.2.2 출력전류 제한기능

부하에서 UPS 용량한계(2.6[KW]) 이상으로 전류가 증가하지 않도록 출력 전류 18[A] 제한기능을 실험하였다. 부하를 단계적으로 증가시켜 전류를 18[A] 이상으로 증가 시 Fig. 16과 같이 출력전류가 18[A] 이상 증가하지 않음을 확인하였다.

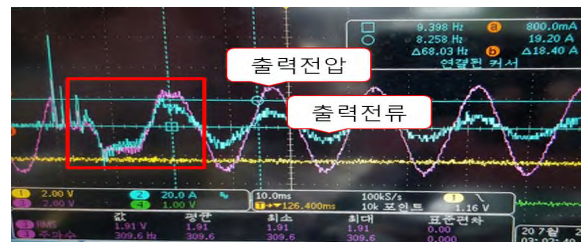


Fig. 16. Waveform that limits output current to 18[A]

##### 4.2.3 출력전류 불평형 시 출력 전류 제한기능

출력 Hot 라인과 Neutral 라인간의 전류 불평형 발생 시 출력 전류 제한 기능에 대하여 실험하였다. 그림 17은 전류불평형 2[A] 이상 발생 시 출력을 제한함을 보여주고 있다.

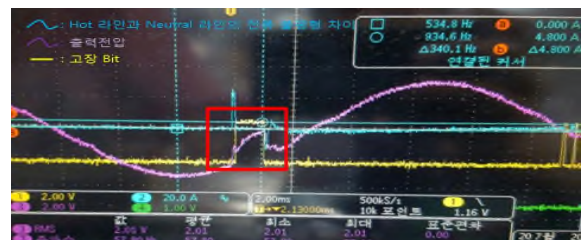


Fig. 17. Waveform that limits output current when current unbalance occurs

#### 4.3 현장시험

UPS가 탑재된 장비는 공장수락시험(FAT: Factory Acceptance Test)거쳐 함정에 탑재되게 된다. 현장시험

은 합상공정에 따라 진행되며, Table 1 시험평가 방법 및 조건에 따라 UPS를 검증하게 된다. 시험절차는 방위청에서 승인된 DT 및 OT 시험평가절차를 따른다.

서로 다른 시기에 건조되는 유사한 함정에 대하여 1.6년에 걸쳐서 시험을 수행하였으며, 동일한 UPS를 함정에 탑재하여 함정의 건조과정에서부터 합상시험평가까지 운용됨으로 UPS에 미치는 영향도 유사하다고 가정할 수 있다.

Table 1. Test evaluation method and conditions

구분	공장 시험	합상시험	
		사전시험	합상시험평가
시험 방법	공장 수락 시험	작동검사 및 연동시험	개발시험평가 (정박수락시험) 운용시험평가 (해상수락시험)
검증 방법	장비 성능 검증	정상 작동 여부 확인 연동 성능 검증	육상 및 해상에서 DT&E 및 OT&E 수행 시 장비의 문제점 분석

Table 2는 동일 함정에 대한 시험결과로서 전투체계 DT&E<sup>1)</sup>, OT&E<sup>2)</sup> 기간(1.6년) 동안 비정상 과도전압으로 인한 UPS 비가용 횟수로서 제안된 회로를 장착한 UPS를 사용한 경우(개선 후)가 기존 UPS(개선 전)에 비해서 UPS 고장률이 현저히 떨어짐을 확인할 수 있다.

Table 2. UPS failure rate for same combat system

함정(UPS대수)	*FX-II 함(11)	*KX-B 함(3)
개선 전 (1번함)	7	2
개선 후 (2번함)	1	0

Table 3은 다양한 함정에 개선된 UPS를 탑재하여 시험을 수행한 결과로서 동일 함정이 아니므로 개선전 후를 직접 비교할 수 없으나 일반적으로 UPS 9대가 함정에 설치했을 때의 평균 고장률이 6번 정도임을 고려할 때 현저하게 낮게 나타남으로써 개선된 UPS의 유용성을 알 수 있다.

Table 3. UPS failure rate for different combat systems

함정(UPS대수)	*DX-I함(12)	*PH함(18)	*TX함(6)
개선 후	1	2	1

### V. 결론

함정 전원 시스템의 비접지 전원 결선방식은 운용 중에 발생하는 이상전압 및 과전류발생으로 인하여 전투체계 전자장비에 심각한 손상을 초래한다.

이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 비정상 과도전압이 발생되면 첫째, 비정상 전원 감지회로를 추가하여 과도전압 발생 시 입력전원을 차단하였고, 둘째, 비정상 과도전압으로 인한 내부 회로 단락으로 인하여 발생하는 과전류를 감지하여 인버터 모듈의 소손 현상을 개선하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션 및 현장 시험을 통하여서 UPS 고장률이 개선됨을 입증하였다.

향후 차기 함정에서도 개선된 UPS를 설치하여 전투체계 전자장비 신뢰성을 확보할 것으로 사료된다.

### REFERENCES

- [1] C. Kim, H.-M. Chang, J.-H. Lee, G.-J. Lee "A Study on Real-Time Operating System for Architecture Improvemnet of Navy Combat System," Journal of the KIMST, Vol.16, no.3, pp. 1-2, 2013.
- [2] K. Hwang, K. Ok, Y. Kim, B. Choi, H. Oh, K. Choi, "A Study on Development direction of Next-generation Naval Combat System Architecture," Journal of the KIMST, Vol.19 no.1, pp. 1-5, 2016.
- [3] D. Shipp, F. Angelini, "Characteristics of different power systems neutral grounding techniques : Fact & Fiction," IEEE 2008 Industry applications society technical conference. Sep. 2008.
- [4] Green Book, "Industrial and Commercial Power Systems : System grounding for uninterruptible power system," IEEE Std. 142, pp. 5-56, 2007.
- [5] "Grounding methods in mission critical facilities," EATON White Paper WP027004EN, 2013.
- [6] H.S.Shim, "Experimental Study of The Floating-Phenomenon on Neutral Ungrounded UPS system," JIEIE, pp. 67~71, 2011.
- [7] J.-G. Kim, E.-W. Lee, J.-H. Jeong, "Analysis on the

1) Development Test & Evaluation (개발시험평가)  
2) Operacionale Test & Evaluation (운용시험평가)

- Operation Characteristics of induction motor by asymmetric,” The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 110-112, Nov. 2003.
- [8] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance,” IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [9] S. S. H. Bukhari, T. A. Lipo, B.-i. Kwon, “An On-Line UPS System that Eliminates the Inrush Current Phenomenon While Feeding Multiple Load Transformers,” ICPE 2015-ECCE Asia, pp.385-390, Jun. 2015.
- [10] S. S. H. Bukhari, S. Atiq, T. A. Lipo, B.-i. Kwon, “A Cost-Effective, Single-Phase Line-Interactive UPS System that Eliminates Inrush Current Phenomenon for Transformer-Coupled Loads,” Journal of Electrical Engineering & Technology Vol.11 no.3, pp. 675-682, Jun. 2016.

---

### 저자 소개

---

#### 김 성 후 (Sung-Who Kim)



1995년 : 동아대학교  
전자공학과(학사)  
2016년 ~ 2018년 : 금오공과대학교  
국방IT시스템공학과(공학석사)  
2002년 ~ 현재 : 한화시스템 연구원  
관심분야 : 인버터 하드웨어,  
디지털신호처리,  
영상처리

#### 최 한 고 (Han-Go Choi)



1979년 : 경북대학교  
전자공학과(학사)  
1988년 : 플로리다대학교  
전기전자공학과(공학석사)  
1992년 : 플로리다대학교  
전기전자공학과(공학박사)  
1979~1986년 국방과학연구소  
연구원

2001년 MIT Research Scientist

1903년 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수

관심분야 : 신호 및 영상처리, 생체신호처리, DSP 응용