



Received: 2026/08/25
Revised: 2026/09/07
Accepted: 2026/09/16
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

GunWoo Park

264-60, Sanho-daero, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do,
39370, Republic of Korea

Tel: +82-54-460-8874

Fax: +82-54-460-8519

E-mail: gunwoo.park@hanwha.com

Abstract

본 논문에서는 고성능 서버 및 무정전전원공급장치가 탑재된 함정용 통합 캐비닛에서의 무정전전원공급장치 운전모드별 잔류전류를 분석하였다. 무정전전원공급장치는 함전원 이상이나 순간 정전이 발생할 경우 전원을 공급해준다. 무정전전원공급장치는 임무 지속성을 확보하기 위해 구성이 필수이나 다수의 전력 변환단과 EMI 필터 및 바이패스 경로가 추가되므로 전원 연속성과 잔류전류 관리 사이의 설계적 절충이 필요하다. 제안 구조는 전원 연속성과 무정전전원공급장치의 기능을 유지하면서 통합 캐비닛의 잔류전류와 전원경로 간 상호영향을 줄이는 설계 대안으로 활용될 수 있다.

In this paper, the residual current for each UPS operation mode was analyzed in a high-performance computer and an integrated cabinet for ships equipped with UPS. UPS is an essential configuration to ensure mission continuity, but a design compromise between power continuity and residual current management is required because multiple power conversion terminals and EMI filters and bypass paths are added. The proposed structure can be used as a design alternative to reduce the mutual impact between the residual current and path of the integrated cabinet while maintaining the function of power continuity and uninterruptible power supply.

Keywords

무정전전원공급장치(Uninterruptible Power Supply),
잔류전류(Residual Current),
누설전류(Leakage Current),
전투체계(Combat Management System),
전원분배(Power Distribution)

고성능 서버 및 무정전전원공급장치 통합 캐비닛에서의 잔류전류 특성 분석 및 저감설계에 관한 연구

A Study on Residual Current Characteristics and Reduction Design in High Performance Computer and Uninterruptible Power Supply Intergrated Cabinet

박건우^{1*}, 전종목², 장우정²

¹한화시스템 기반연구소 HW3팀 선임연구원

²한화시스템 기반연구소 HW3팀 전문연구원

GunWoo Park^{1*}, JongMok Jeon², WooJung Jang²

¹Engineer, Infra R&D Center HW3 Team, Hanwha Systems

²Senior engineer, Infra R&D Center HW3 Team, Hanwha Systems

1. 서론

함정용 전투체계 캐비닛은 제한된 설치 공간에서 대용량 데이터를 실시간으로 처리하고 통신 기능을 지속해야 한다. 이에 따라 고성능 서버, 네트워크 스위치, 내부 제어장치, UPS를 하나의 캐비닛에 집적하는 구성이 일반적이다. 이러한 통합 캐비닛은 공간 확보와 배선을 줄이고 장비 간 인터페이스와 정비 절차를 표준화할 수 있으나 다수의 스위칭 전원공급장치와 EMI 필터가 병렬로 연결되므로 잔류전류와 보호 도체 전류가 누적될 수 있다[1].

UPS는 함전원 이상이나 순간 정전이 발생할 경우, 주요 부하에 전원을 공급하여 임무 지속성을 높인다. 그러나 정류회로, DC 링크, 인버터 및 입출력 EMI 필터를 포함하므로 단순한 직결 전원 계통보다 전원선-접지 간 등가 정전용량과 공통모드 귀환경로가 증가할 수 있다. 따라서 UPS 적용은 전원 연속성을 향상하는 동시에 잔류전류 경로를 복잡하게 만드는 설계적 트레이드 오프를 수반한다[2].

본 연구에서 활용하고자 하는 통합 캐비닛에서의 주전원과 선택전원은 서로 독립된 전원이 아니라 동일한 함전원에서 파생된 분기

경로이다. 주전원은 함전원에서 직접 공급되고, 선택 전원은 UPS 운용모드에 따라 주전원 또는 UPS 출력을 선택하여 공급된다.

기존 통합 캐비닛 전원분배장치의 AC 분배모듈은 부하에 필요한 전원을 안정적으로 공급하기 위해 두 분기 입력이 AC 입력 라인을 공유하는 설계가 반영되어 있으나 이는 본질적인 오류가 있는 구조는 아니다.

본 연구의 목적은 정상 보호접지 연결 조건에서 UPS 운전 모드별 L-N 잔류전류 특성을 분석하고, 기존 기능을 유지하면서 AC 입력 경로를 분리하고 DC 출력단에서 결합하는 개선안을 제안하고자 하며 개선 효과를 정량적으로 평가하고자 한다[4].

2. 잔류전류 경로 및 개선안

2.1 통합 캐비닛에서의 잔류전류 경로

통합 캐비닛은 함전원을 통해 전원을 공급받으며, 주전원 경로와 UPS를 경유할 수 있는 선택 전원 경로로 분기된다. 두 입력 전원은 정상상태에서 중성선 및 보호접지를 공유하므로 분기 경로의 필터와 배선이 AC 분배모듈 내부에서 다시 결합될 경우 부하전류 일부가 중성선 이외의 경로로 귀환할 수 있다. UPS 운전 모드 k 에서 L과 N을 동시에 클램핑하여 측정되는 잔류전류는 식 (1)과 같다.

$$I_{RES,k} = |I_{L,k} + I_{N,k}| \quad (1)$$

이상적인 단상 회로에서는 L과 N의 전류의 크기는 같고 방향은 반대이므로 $I_{RES,k}$ 는 0에 근접한다. 측정값이 증가한다는 것은 전류의 일부가 보호접지, 샤시 본딩, EMI 필터 또는 다른 분기 경로를 통해 귀환하고 있음을 알 수 있다. 전원선과 보호접지 사이의 정전용량 성분으로 인한 누설전류는 식 (2)에 의해 근사된다.

$$I_C = 2\pi f C_{eq} V \quad (2)$$

여기서 C_{eq} 는 UPS, 고성능 서버, 네트워크 장치, 전원 공급기와 배선의 전원선-접지 간 등가 정전용량이다.

UPS 운전모드 k 의 잔류전류는 UPS 및 부하 자체의

성분과 AC 분기 경로 간 결합성분의 벡터합으로 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$I_{RES,k} = |I_{load,k} + I_{UPS,k} + I_{PDU,k} + I_{coupling,k}| \quad (3)$$

통합 캐비닛과 UPS는 임무 지속성을 위해 필요하지만 전력변환단, EMI 필터, 바이패스 경로가 추가될수록 $I_{UPS,k}$ 와 $I_{coupling,k}$ 의 관리가 복잡해진다. 본 연구의 목표는 UPS 기능과 보호접지를 변경하지 않고, 동일 함전원에서 분기된 두 입력경로 사이에 추가되는 $I_{coupling,k}$ 를 선택적으로 줄이고자 한다.

2.2 잔류전류 저감을 위한 AC 전원분배 개선

Fig. 1과 같이 주전원과 선택 전원은 동일한 함전원에서 파생되며, 선택 전원은 운전 상태에 따라 주전원 또는 UPS 출력을 선택한다.

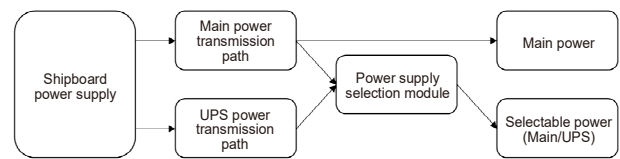


Fig. 1. System power input diagram

Fig. 2의 기존 모듈은 두 분기입력을 AC 측에서 공통모드로 구성한 후, 두 개의 AC/DC 전원공급기에 인가하도록 설계되어 있다. 기존 구조는 12V 제어 전원 공급과 전원 선택기능을 간소화하여 구현하였다. 그러나 공통 입력 노드와 필터를 통해 분기 경로 간 결합 또는 순환전류가 형성될 가능성이 있다.

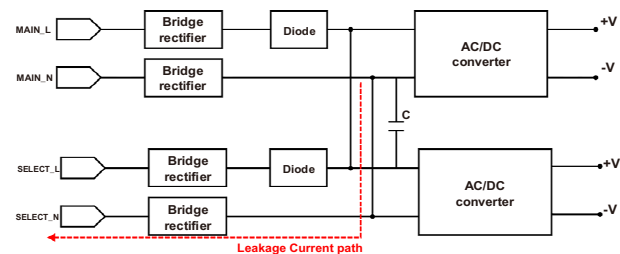


Fig. 2. Conventional AC distribution circuit

Fig. 3의 개선안은 각 AC 입력을 독립된 AC/DC 전원공급기에 연결하고, 절연된 DC 출력에 한해 di-

ode 1과 diode 2를 통해 결합한다. 보호접지와 샤시 본딩은 개선 전후 동일하게 유지한다.

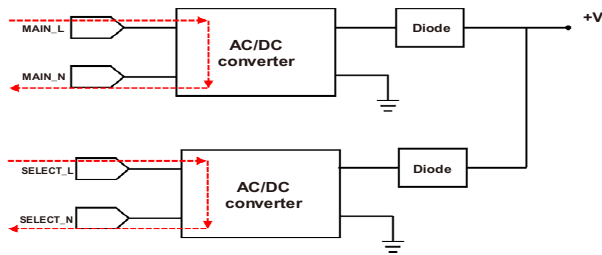


Fig. 3. Optimized AC distribution circuit

개선 전후의 잔류전류는 식 (4), (5)와 같이 기본 성분과 분기 경로 결합성분의 벡터합으로 구체화할 수 있다.

$$I_{before,k} = |I_{\Delta,k} + I_{branch,k}| \quad (4)$$

$$I_{after,k} = |I_{\Delta,k} + I_{remain,k}| \quad (5)$$

$I_{\Delta,k}$ 는 UPS 및 부하 자체의 필터 및 배선에서 발생하는 성분이며, $I_{branch,k}$ 는 기존 AC 공통 노드로 인해 추가될 수 있는 분기 경로 간 결합 성분이다. 개선안은 $I_{\Delta,k}$ 를 제거하지 않고 $I_{branch,k}$ 를 줄이는 방식으로 운전 모드 k에 따라 저감 효과가 다르게 나타나는 것이 일반적이다.

3. 시험 구성 및 평가방법

3.1 시험대상 및 측정조건

시험대상은 UPS, 고성능 서버 및 내부 제어장치로 구성된 통합 캐비닛이다. 주전원과 선택 전원은 동일

Table 1. Test configuration

Parameter	Test conditions
Measurement target	Residual current at L-N
Grounding	Normal protective grounding Chassis bonding connection
Comparison target	AC common-mode AC path separation
UPS operating modes	Online battery back-up Automatic bypass Manual bypass

한 합전원에서 파생되며, 캐비닛의 정상 보호접지가 연결된 상태에서 입력 L, N선을 하나의 클램프로 동시에 측정하였다. 개선안에 대한 전후 비교는 UPS 온라인모드, UPS 백업모드, 자동 바이패스, 수동 바이패스의 운전 모드별로 수행하였다[3].

3.2 정량평가 지표

UPS 운전 모드 k의 절대 감소량 ΔI_k , 저감률 R_k 및 개선계수 F_k 는 식 (6)~(8)로 계산하였다.

$$\Delta I_k = I_{before,k} - I_{after,k} \quad (6)$$

$$R_k = \left(\frac{\Delta I_k}{I_{before,k}} \right) \times 100 \quad (7)$$

$$F_k = \frac{I_{before,k}}{I_{after,k}} \quad (8)$$

F_k 는 개선 후 잔류전류가 개선 전 대비 몇 배 감소하였는지를 나타내는 비교 지표이다. 반복 측정자료가 확보되지 않았으므로 평균-표준편차와 통계적 유의성 검정은 수행하지 않았고, 측정값과 AC 전원 분배 회로의 물리적 대응관계를 중심으로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 개선 전후의 운전 모드 별 잔류전류

온라인모드에서는 64.0 mA가 5.3 mA로 감소하여 58.7 mA의 절대 감소량, 91.7%의 저감률 및 12.08의 개선계수를 나타냈다. 합전원에서 파생된 주전원 및 선택전원 경로의 입력필터, UPS와 제어 전원이 동시에 연결되므로 기존 AC 공통 모드의 L-N 잔류전류의 추가 귀환경로로 작용했을 가능성이 크다.

배터리 백업 모드는 4.5 mA에서 4.4 mA로 변화가 거의 없었다. 상위 AC 입력전원이 차단되고 UPS 인버터가 부하를 공급하는 상태에서는 기존 AC 공통 모드에 의한 분기경로 결합 성분이 작아지므로 개선 효과가 제한적으로 나타난 것으로 해석할 수 있다. 자동 바이패스 역시 35.0 mA에서 34.0 mA로 저감률이 2.9%에 불과하였다. 이는 자동 바이패스 상태의 지배적인 잔류성분이 AC 분배모듈보다 UPS 내부 정적

스위치, 바이패스 중성선, 부하측 EMI 필터 또는 상위 전원계통에 존재할 가능성을 시사한다.

수동 바이패스는 44.8 mA에서 31.4 mA로 29.9%로 감소하였다. AC 공통 모드 경로의 일부 영향은 제거되었지만 바이패스 경로와 UPS 입력 경로가 동시에 연결된 상태에서는 UPS 내부 필터 및 중성선 경로가 남을 수 있다. 따라서 본 개선안은 UPS 온라인 모드와 대기 상태에서 특히 효과적이며, 바이패스 모드의 잔류전류는 UPS 내부 및 상위 배선구조를 별도로 검토할 필요가 있다[5].

4.2 부하분리 시험의 보조적 해석

부하 분리 시험은 통합 캐비닛에 구성된 고성능 서버의 고유 누설전류를 산정하기 위한 시험이 아니라 주요 부하와 전원 변환/분배 계통의 상대적 기여 역할을 확인하기 위한 보조자료로 사용하였다. 시험 시점과 세부 회로조건이 개선 전후 비교시험과 완전히 동일하다고 보기 어려우므로 직접 합산하거나 개선 효과의 근거값으로 사용하지 않았다.

Table 2. Test configuration

UPS operating mode	load connection (mA)	load disconnection (mA)	Relative reduction rate (%)
Online	28.4	20.8	26.8
Automatic bypass	10.6	5.9	44.3
Manula bypass	23.0	19.7	14.3

온라인 모드에서는 주요 부하 분리 후에도 20.8 mA가 남았고, 수동 바이패스에서도 19.7 mA가 잔존하였다. 이는 고성능 서버가 잔류전류의 일부를 구성하지만 UPS, 전원분배모듈, AC/DC 전원공급기 및 배선 결합구조도가 중요한 발생영역임을 보조적으로 보여준다. 다만, 전류의 위상과 귀환경로가 장비 연결상태에 따라 변하므로 Table 2의 차이값을 특정 장비의 고유 누설전류로 판단해서는 안 된다.

4.3 개선안의 설계 고찰

첫째, 본 연구의 개선안은 기존 모듈의 기능적 오류를 수정한 것이 아니라 UPS, 고성능 서버 및 내부 제

어장치가 집적된 통합 캐비닛에서 확인된 잔류전류 특성을 반영하여 전원 결합지점을 AC 입력단에서 DC 출력단으로 이동한 최적화 설계로 기존 기능을 유지하면서 분기 경로 간 전기적 상호영향을 줄이는데 의의가 있다.

둘째, 출력 다이오드는 전압강하와 열손실을 발생시킨다. 개선회로 적용 시 다이오드 정격, 접합온도, 방열, 역전압에 대해서도 함께 검토해야 한다. 주전원과 선택전원은 동일한 합전원에서 파생되므로 개선키 구조를 독립 전원 이중화로 해석해서는 안 된다. 상위 분전반의 차단이나 공급 경로 장애는 두 경로에 동시에 영향을 줄 수 있으며, 정전 시 전원 연속성은 UPS 배터리와 인버터가 담당한다. 따라서 개선안의 효과는 전원 가용도의 증가로 평가될 것이 아니라 AC 분기 경로 간 결합 저감, 전류 경로의 단순화 및 고장 원인 식별성 향상으로 평가되어야 한다.

셋째, 온라인 모드에서 저감효과가 크고 자동 바이패스에서는 제한적이었다는 결과는 잔류전류의 발생원이 단일하지 않음을 보여준다. 향후에는 UPS 바이패스 스위치의 극수와 중성선 개폐 여부, 각 부하의 Y-커패시터, 케이블 실드와 복수 본딩 경로를 계층적으로 분석해야 한다. 또한 방위산업 적용 시에는 잔류전류 저감률 뿐만 아니라 DC OR-ing 부품의 온도 디레이팅, 절연거리, 서지·EFT 내성 및 고장 표시 기능까지 함께 검증해야 하며, 보호 접지와 샤시 본딩은 안전을 위해 제거하거나 개폐해서는 안 된다.

5. 결론

본 연구에서는 동일한 합전원에서 파생된 주전원 및 선택전원 경로를 갖는 방위산업용 통합 캐비닛을 대상으로 UPS 운전모드별 L-N 잔류전류를 분석하고, AC 전원분배모듈의 입력 경로를 분리하는 개선안을 제안하였다. 통합 캐비닛과 UPS는 공간효율, 정비성 및 임무 지속성을 확보하기 위한 필수 구성이다. 하지만 다수의 전력변환단과 EMI 필터 및 바이패스 경로가 추가되므로 전원 연속성과 잔류전류 억제 사이의 설계적 절충이 필요하다. 또한 주전원과 선택전원은 독립 전원원이 아니라 동일 합전원에서 파생된 분기경로이며, 정전 시 연속성은 UPS의 배터리·인버터 기능에 의해 확보된다.

기존 AC 입력 구조는 DC 12V 제어전원 공급과 전

원 선택기능을 위한 정상적인 설계이며, 본 연구를 통한 개선안은 이를 잘못된 구조로 판단한 것이 아니라 잔류전류 관점에서 최적화한 것이다. AC 입력을 분리하고 DC 12V 출력에 한해 다이오드 OR-ing한 결과, 온라인 모드는 64.0 mA에서 5.3 mA로 91.7%, 대기 모드는 75.2%, 수동 바이패스는 29.9%로 감소하였다.

배터리 백업 및 자동 바이패스 모드의 변화가 작았다는 결과는 개선안이 UPS와 부하 자체의 모든 누설 성분이 아니라 기존 AC 공통 노드에 의해 추가되는 분기경로 결합성분을 선택적으로 억제함을 보여준다. 제안 구조는 전원 이중화가 아닌 단일 상위 전원 계통 내 경로분리 설계로 UPS 기능을 유지하면서 잔류전류와 분기경로 간 상호영향을 줄일 수 있다. 향후에는 동일 조건의 반복측정, 보호도체 전류 동시 측정, 주파수 스펙트럼 및 모드 전환 과도전류 분석을 통해 통계적 신뢰성과 발생원 분리의 정확도를 높일 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Department of Defense, MIL-STD-461-H, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, April 17, 2026.
- [2] IEC 62040-2:2016, Uninterruptible Power Systems (UPS) – Part 2: Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [3] IEC 62040-1:2017, Uninterruptible Power Systems (UPS) – Part 1: Safety Requirements, International Electrotechnical Commission, 2022.
- [4] IEC 60990:2016, Methods of Measurement of Touch Current and Protective Conductor Current, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [5] H. Akagi & T. Doumoto, 'A Passive EMI Filter for Preventing High-Frequency Leakage Current From Flowing Through the Grounded Inverter Heat Sink of an Adjustable-Speed Motor Drive System,' IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 41, NO. 5, 2005, pp. 1215-1223.