

다지점 누설전류 기반 UPS 고장 위치 식별을 위한 On-Device AI 기법

김원*, 정태민*, 박화평*

*한국에너지공과대학교 차세대그리드

e-mail:a103203@kentech.ac.kr

An On-Device AI for Fault Identification for Residual Currents

Wan Kim*, Tae-Min Jeong*, Hwa-Pyeong Park*

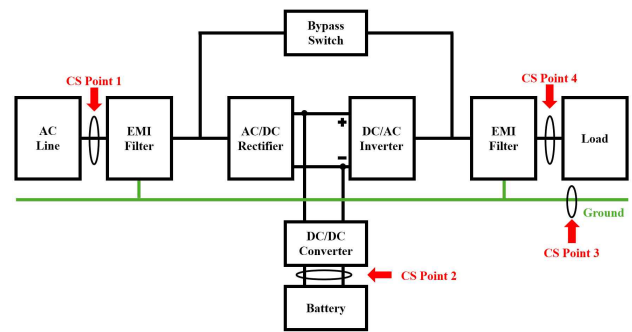
*Grid Modernization, Korea Institute of Energy Technology

요약

기존 UPS(Uninterruptible Power Supply)는 입력단에서 단일 누설전류만을 측정하는 구조를 사용하기 때문에, 다단 전력변환 구조 내부에서 발생하는 고장의 위치를 구분하기 어렵고, 제한된 관측 정보로 인해 고장 검출 성능에도 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 입력, 배터리, 출력, 보호접지의 네 지점에서 측정된 누설전류를 동시에 활용하는 다지점 기반 고장 위치 식별 기법을 제안한다. 각 고장 유형은 발생 위치에 따라 누설전류의 크기, 시간적 변동 특성, 그리고 주파수 성분에서 서로 다른 패턴을 나타내며, 이러한 다채널 신호 간의 상대적인 변화를 분석함으로써 고장 여부뿐만 아니라 발생 위치까지 효과적으로 식별할 수 있다. 제안된 방법에서는 누설전류 시계열 데이터를 1D-CNN 모델의 입력으로 사용하여 특징 패턴을 학습하였으며, 학습된 모델은 FPGA 기반 On-Device AI 구조로 구현되어 실시간 고장 판단을 수행한다. 제안 기법은 100 kW급 온라인 UPS 프로토타입을 통해 실험적으로 검증되었으며, 이를 통해 다지점 센싱 기반 접근의 유효성을 확인하였다.

1. 서론

UPS(Uninterruptible Power Supply)는 데이터센터, 금융 기관, 클라우드 인프라 등과 같이 연속적인 전력 공급이 필수적인 시스템에서 안정적인 전력을 제공하기 위해 널리 사용되는 장치이다^{[1]-[5]}. 특히 정보 시스템의 의존도가 증가함에 따라, UPS의 신뢰성은 전체 시스템의 안정성과 직결되는 중요한 요소로 인식되고 있다^[6]. 그러나 UPS 내부에서 발생하는 절연 열화 및 누설 전류 기반 고장은 시스템 성능 저하뿐만 아니라, 심각한 경우 화재 및 서비스 중단으로 이어질 수 있어 이에 대한 신속하고 정확한 진단 기술이 요구된다^[6]. 기존 UPS에서는 입력단에서 측정된 단일 누설전류를 기반으로 고장을 판단하는 구조를 일반적으로 사용한다. 이러한 방식은 구현이 간단하다는 장점이 있으나, 다단 전력변환 구조를 갖는 UPS 내부에서 발생하는 다양한 고장을 구분하기에는 한계가 존재한다. UPS는 정류기, 배터리, DC/DC 컨버터, 인버터 등 여러 전력 변환 단계로 구성되며, 각 단계는 서로 다른 전류 경로와 동작 특성을 가진다^{[6],[8]}. 따라서 고장 발생 위치에 따라 누설전류의 크기뿐만 아니라 시간적 및 주파수 특성이 다르게 나타난다. 그러나 단일 입력단 기반 측정 방식에서는 이러한 차이를 충분히 반영할 수 없어, 고장 위치



[그림 1] 다지점 누설전류 센싱을 포함한 UPS 시스템 구성.

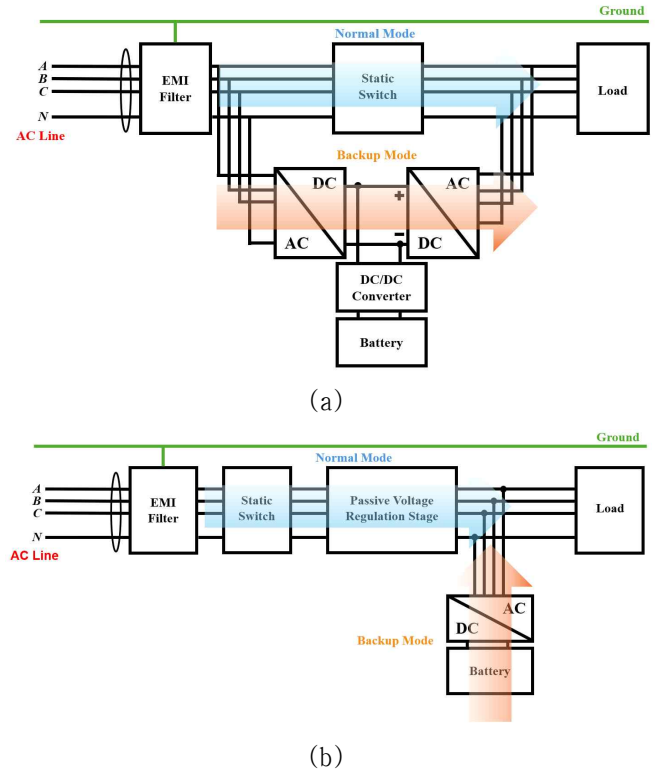
를 식별하는 것이 어렵고 검출 정확도 또한 제한되는 문제가 발생한다. 일반적으로 누설전류 기반 보호를 위해 Residual Current Device(RCD)가 널리 사용되고 있으며, 이는 전체 전류의 불평형을 기반으로 절연 이상을 검출하는 방식이다^{[9]-[11]}. 저전압 배전 시스템에서는 효과적인 보호 수단으로 활용되고 있으나, UPS와 같은 다단 구조에서는 각 변환 단계에 개별적으로 적용하기 어렵기 때문에 실제 시스템에서는 입력단에 단일 RCD만을 설치하는 경우가 대부분이다. 이와 같은 구조에서는 UPS 내부에서 발생하는 고장의 위치를 식별할 수 없으며, 다양한 고장 유형에 대해 동일한 기준을 적용함으로써 오검출 또는 미검출이

발생할 가능성이 존재한다.

이러한 한계를 극복하기 위해서는 UPS 내부 여러 지점에서 누설전류를 동시에 측정하고, 이를 기반으로 고장 특성을 통합적으로 분석하는 접근이 필요하다. 그림 1과 같이 입력, 배터리, 출력, 보호접지의 네 지점에서 측정된 누설전류는 고장 발생 위치에 따라 서로 다른 크기, 시간적 변동 특성, 그리고 주파수 특성을 나타낸다. 특히 입력 고장의 경우 입력 채널에서 두드러진 변화가 나타나며, 배터리 고장의 경우 배터리 채널과 입력 채널 간의 연관된 변화가 발생한다. 출력 고장은 출력 채널과 접지 경로를 중심으로 특징적인 변화를 나타내며, 이러한 차이는 고장 위치 식별에 중요한 정보를 제공한다. 다지점 센싱을 통해 획득된 누설전류 신호는 단순한 크기 비교뿐만 아니라, 시간에 따른 변화와 채널 간 상관관계를 함께 고려할 필요가 있다. 그러나 RMS, EV, FFT와 같은 개별 특징을 기반으로 threshold를 설정하는 기존 방식은 특정 고장 조건에서는 효과적일 수 있으나, 다양한 고장 유형을 동시에 고려하는 데에는 한계가 존재한다. 이는 각 고장 유형이 서로 다른 특성을 가지기 때문에 단일 기준으로 모든 고장을 정확하게 구분하기 어렵기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 1D-CNN은 시간축을 따라 국소적인 패턴을 추출할 수 있는 구조로, 전류 신호와 같은 시계열 데이터 분석에 적합하다. 또한 비교적 적은 파라미터로 구현이 가능하여 임베디드 환경에서도 효율적으로 적용할 수 있다는 장점을 가진다.

UPS 시스템은 구조 및 동작 방식에 따라 오프라인형 (offline), 라인 인터랙티브형(line-interactive), 그리고 온라인형(online)으로 구분된다. 그림 2 (a)에 나타난 오프라인형 UPS는 정상 상태에서는 상용 전원을 static switch를 통해 부하에 직접 공급하고, 정전 또는 이상 발생 시에만 인버터를 통해 전력을 공급하는 구조를 가진다. 이와 같은 방식은 구조가 비교적 단순하다는 장점이 있으나, 전환 과정에서 순간적인 전력 단절이나 전압 변동이 발생할 수 있다. 반면, 그림 2 (b)의 라인 인터랙티브형 UPS는 전압 조정 단계를 통해 입력 전원의 변동을 보상함으로써 보다 안정적인 전력 공급이 가능하지만, 계통 주파수에 영향을 받으며 제어 구조가 복잡하다는 한계가 존재한다. 이와 달리 온라인형 UPS는 정류기와 인버터를 포함하는 double-conversion 구조를 기반으로 동작하며, 입력 전원을 직류로 변환한 후 다시 교류로 변환하여 부하에 공급한다. 이러한 구조는 입력과 출력 간의 전기적 절연을 제공하고, 전원 이상 발생 시에도 전환 지연 없이 안정적인 전력 공급이 가능하다는 장점을 가진다. 따라서 높은 신뢰성이 요구되는 시스템에서는 온라인형 UPS가 가장 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 이러한 온라인형 UPS 구조를 기반으로 내부



[그림 2] UPS 시스템 구조: (a) 오프라인형 UPS, (b) 라인 인터랙티브형 UPS.

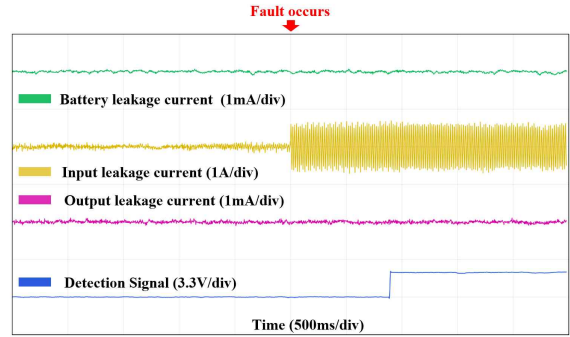
고장 검출 및 위치 식별 기법을 제안한다. 특히 입력선, 배터리, 출력단, 보호 접지의 네 지점을 주요 센싱 위치로 선정하였다. 각 지점은 UPS 내부 전류 흐름과 누설 경로를 대표하며, 고장 발생 위치에 따라 서로 다른 전류 특성을 나타낸다. 이러한 다지점 센싱 구조를 통해 기존 단일 누설전류 기반 방식의 한계를 극복하고, 보다 정확한 고장 진단이 가능하도록 하였다. 또한 제안된 방법에서는 다채널 누설전류 시계열 데이터를 기반으로 RMS, 시간적 변동 특성, 주파수 성분을 포함한 특징을 구성하고, 이를 1D-CNN 모델의 입력으로 활용하여 고장 패턴을 학습한다. 이를 통해 고장 여부뿐만 아니라 발생 위치까지 동시에 식별할 수 있도록 하였다. 더 나아가 학습된 모델은 FPGA 기반 On-Device AI 구조로 구현되어 외부 연산 장치 없이 실시간으로 고장 판단이 가능하도록 설계되었다. 이는 시스템 내부에서 직접 데이터를 처리하고 즉각적인 의사결정을 수행할 수 있어, 고장 검출 지연을 최소화하고 추가적인 하드웨어 비용 없이 적용할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 UPS 시스템은 Bypass 모드와 Double Conversion 모드와 같이 운전 조건에 따라 전류 흐름 경로가 달라지므로, 동일한 고장 조건에서도 서로 다른 신호 특성이 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 운전 모드 변화에 따른 특성 차이까지 함께 고려하여 모델을 설계함으로써, 다양한 운전 환경에서도 안정적인 고장 검출 및 위치 식별이 가능하도록 하였다.

2. 본론

다지점에서 측정된 누설전류 신호는 시간에 따라 변화하는 시계열 데이터의 형태를 가지며, 고장 발생 시 채널별로 서로 다른 특성을 나타낸다. 이러한 특성을 효과적으로 반영하기 위해 본 연구에서는 누설전류 신호로부터 RMS, EV, FFT 기반 특징을 추출하여 고장 특성을 정량적으로 표현하였다. RMS는 누설전류의 크기 변화를 나타내는 지표로, 고장 발생 시 전류의 전체적인 에너지 증가를 반영한다. EV(Energy Variation)는 RMS 값의 시간적 변동성을 나타내며, 고장 시 신호의 불안정성과 리플 증가를 반영한다. 또한 FFT 기반 특징은 주파수 영역에서의 변화를 분석하기 위한 것으로, 입력 및 출력 고장의 경우 60 Hz 부근에서의 성분 증가가 두드러지게 나타나며, 배터리 고장의 경우 저주파 영역에서의 변화가 특징적으로 나타난다.

이와 같이 RMS, EV, FFT 특징을 개별적으로 활용할 경우 특정 고장 조건에서는 정상 상태와 고장 상태를 효과적으로 구분할 수 있으나, 하나의 고장 유형에 최적화된 특징이 다른 고장 조건에서는 동일하게 적용되기 어려운 한계가 존재한다. 즉, 단일 threshold 기반 방식으로 모든 고장을 동시에 판단할 경우 다양한 고장 특성을 충분히 반영하지 못하여 검출 성능이 저하된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 다지점 누설전류 신호를 1D-CNN 모델의 입력으로 구성하여, 시간에 따른 변화와 채널 간 상관관계를 동시에 학습하도록 하였다. 1D-CNN은 시간축을 따라 국소적인 특징을 추출함으로써 고장 발생 시 나타나는 복합적인 패턴을 효과적으로 반영할 수 있으며, 짧은 시간 구간에서의 변화에도 민감하게 반응하여 실시간 고장 검출 및 위치 식별에 적합하다. 학습된 모델은 FPGA 기반 On-Device AI 구조로 구현되어 외부 연산 장치 없이 실시간 추론이 가능하도록 구성하였다.

본 연구에서는 정상 상태와 함께 배터리, 입력, 출력 고장을 포함하는 다양한 조건을 고려하여 데이터를 수집하였다. 각 데이터는 입력, 배터리, 출력, 보호접지의 네 채널로 구성된 누설전류 신호를 포함하며, Bypass 모드와 Double Conversion 모드에서 각각 측정되었다. 또한 각 채널은 충분한 시간 길이를 가지는 시계열 데이터로 구성되어, 고장 발생 시 나타나는 시간적 변화와 채널 간 특성 차이를 함께 반영할 수 있도록 하였다. 학습 데이터와 테스트 데이터를 분리하여 모델의 일반화 성능을 평가하였다. 제안된 기법의 성능을 평가한 결과, 표 1과 같이 고장 검출 정확도는 Bypass 모드에서 97.20%, Double Conversion 모드에서 97.46%로 나타났으며, Precision과 Recall 또한 높은 값을 유지하였다. 또한 고장 위치 식별 성능은 두 운전 모드 모두에서 약 99% 이상의 정확도를 나타내어, 다양한 조건에서도 안정적으로 고장 위치를 구분할 수 있음을 확인하였다. 그림 3은 Bypass 모드에서 출력 고장 조건의 실시간 실험 결과를 나타낸



[그림 3] Bypass 모드일 때 출력 고장 조건에서의 실험 결과.

[표 1] 고장 검출 성능

Mode	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
Bypass	97.20	100.00	96.27	98.10
Double Conversion	97.46	100.00	96.61	98.28

것으로, 고장 발생 이후 특정 채널에서 누설전류의 변화가 뚜렷하게 나타나며 검출 신호가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 대표적인 사례로 Bypass 모드의 출력 고장 결과를 제시하였으나, Double Conversion 모드 및 입력, 배터리 고장 조건에서도 유사한 특징 변화가 나타났으며, 모든 고장 유형에 대해 안정적인 검출 및 위치 식별이 가능함을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 다지점 누설전류 기반 On-Device AI를 활용한 UPS 고장 진단 및 위치 식별 기법을 제안하였다. 입력, 배터리, 출력, 보호접지의 네 지점에서 측정된 누설전류를 기반으로 1D-CNN 모델을 학습하여 고장 여부와 위치를 동시에 판단하도록 하였다. 실험 결과, Bypass 모드와 Double Conversion 모드에서 각각 97.20%와 97.46%의 고장 검출 정확도를 나타냈으며, 고장 위치 식별 또한 약 99% 이상의 높은 성능을 보였다. 또한 다양한 고장 조건에서 안정적인 검출이 가능함을 확인하였다. 제안된 모델은 FPGA 기반 On-Device AI 구조로 구현되어 외부 연산 없이 실시간 적용이 가능하며, 이를 통해 기존 방식의 한계를 극복할 수 있음을 확인하였다. 본 기법은 UPS 시스템의 신뢰성 향상에 기여할 수 있는 실용적인 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Y. Dong, G. Zhang, G. He, and W. Si, "A novel control strategy for uninterruptible power supply based on backstepping and fuzzy neural network," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 5306-5313, 2023.

- [2] C.-C. Yeh and M. D. Manjrekar, "A reconfigurable uninterruptible power supply system for multiple power quality applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1361-1372, Jul. 2007.
- [3] A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi, and A. Troudi, "Battery/supercapacitors combination in uninterruptible power supply (UPS)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1509-1522, Apr. 2013.
- [4] C. V. Nayar, M. Ashari, and W. W. L. Keerthipala, "A grid-interactive photovoltaic uninterruptible power supply system using battery storage and a back up diesel generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 3, pp. 348-353, Sep. 2000.
- [5] M. S. Racine, J. D. Parham, and M. H. Rashid, "An overview of uninterruptible power supplies," in *Proc. 37th Annu. North Amer. Power Symp. (NAPS)*, 2005, pp. 159-164.
- [6] N. Vazquez, C. Aguilar, J. Arau, R. O. Caceres, I. Barbi, and J. A. Gallegos, "A novel uninterruptible power supply system with active power factor correction," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 3, pp. 405-412, May 2002.
- [7] J. Liao, C. Guo, L. Zeng, W. Kang, N. Zhou, and Q. Wang, "Analysis of residual current in low-voltage bipolar DC system and improved residual current protection scheme," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1-13, 2022.
- [8] X. Luo, Y. Du, X. H. Wang, and M. L. Chen, "Tripping characteristics of residual current devices under nonsinusoidal currents," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1515-1521, May-Jun. 2011.
- [9] F. Freschi, "High-frequency behavior of residual current devices," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1629-1635, Jul. 2012.
- [10] M. Mitolo, "Shock hazard in the presence of protective residual-current devices," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 4, pp. 1552-1557, Jul.-Aug. 2010.
- [11] S. Karve, "Three of a kind [UPS topologies, IEC standard]," *IEE Rev.*, vol. 46, pp. 27-31, 2000.