# EMT 기반 변압기의 내부 사고 검출 알고리즘의 성능 평가

**박성준***, 송우혁*, 김진호* 안태풍**, 김병기*, 박철원*
강원대학교*, 인텍전기전자**

# Performance Evaluation of Internal Fault Detection Algorithm for EMT-Based Transformer

Sung-June-Park*, Woo-Hyuk-Song*, Jin-Ho Kim*, Tae-Pung An**, Byung-Ki Kim*, Chul-Won Park*
Kangwon National University*, ENTEC**

**Abstract** - It has been reported and confirmed that fault phenomena different from those in existing synchronous generator-connected systems occur due to the grid connection of inverter-based resources (IBRs) and renewable energy sources. Consequently, there is a need to supplement protection techniques in accordance with the necessity of diagnosing protection reliability for power grids where large-scale renewable energy complexes are connected. To prevent malfunctions of the 87T, this paper models the transformer system using EMT, proposes an internal fault detection algorithm, and evaluates its performance.

## 1. 서 론

다양한 부하의 전기화(Electrification), AI Data Center 및 EV의 수요 증가는 전기에너지 소비 증가의 주요한 원인인 가운데, 미국 전력 설비의 교체 주기를 맞아 변압기 수요 증가와 반도체 공장 증설 등의 신규 설비 수요 증가로 전력 산업의 Super Cycle이 도래하고 있다. 근래, 보호 엔지니어에게 변압기를 보호하기 위하여 IED 및 기타 장치를 적절히 적용하는 데 도움이 되는 정보를 전력용 변압기 보호를 위한 IEEE Guide에서 제공하고 있다[1]. 한편, 인버터 기반 발전원(IBRs, Inverter based resources), 신재생e 계통 연계로 인하여 기존 동기발전기 연계 계통과는 상이한 고장 현상이 나타나는 것이 보고되고 확인되고 있다. 이에 전력망에 대규모 신재생발전단지가 연계될 계통에 대하여 보호신뢰도 진단의 필요성에 따라 보호 기법의 보완이 요구되고 있다. 또한, 보호시스템의 오동작 가능성이 방지되어야 하며 전력망의 안정도가 유지되어야 한다[2].

관련된 국내 연구 동향으로는, EMTP를 활용한 345kV 변압기 후비보호 동작원인 분석 및 대책 사례, 345kV 단권변압기용 보호계전기 실 계통 모의시험에 관한 연구 및 철심의 자기포화 특성을 고려한 CT 모델링 기법에 관한 연구가 수행되었다[3-5]. 또한, 변압기 내부 사고(Internal Fault) 고장전류 해석을 위한 수학적 모델링, 전력용 변압기 전류비율차동보호계전기(CRDR, Current Rational Differential Relay) 영상분 보상 필요성 분석, MATLAB Simulink를 이용하여 154kV 3권선 변압기의 내부고장에 대한 사용자 정의 모델(UDM, User-Defined Model)이 제안되었다[6-8]. 최근에는 ATP-EMTP를 이용한 단권변압기 내부고장 사례 연구와 디지털트윈 기술을 이용한 전력용 변압기의 차동 보호 오동작 방지에 관한 연구가 발표되었다[9, 10].

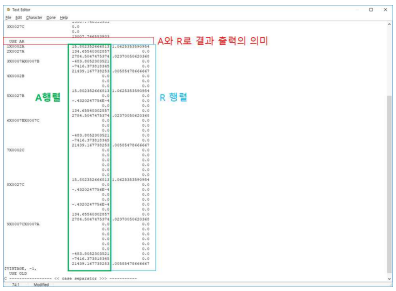
관련된 해외 연구 동향으로는, 정상 시퀀스 고장 성분을 이용한 능동 배전망(ADN, active distribution networks)의 전류 차동 보호 방식, CT 포화를 고려한 변압기용 DWT(Discrete Wavelet Transform)를 사용한 개선된 적응형 차동 보호, 변압기의 차동 어드미턴스 모니터링을 통한 인터턴 단락 검출(Inter-Turn Short-Circuit Detection)이 제시되었다[11-13]. 또한, ANN 기반 영상분 적분 안정화 기법을 이용한 변압기 내부 권선 보호, SVM(Support Vector Machine) 및 DWT 접근법을 이용한 전력용 변압기 권선 고장검출, 변압기 FRA(Frequency Response Analysis) 신호의 다변량 그래픽(Multivariate Graphical) 분석: 자동 권선 고장 진단을 위한 통합 진폭-위상 접근법, 전기적 지표 기반 3상 변압기 권선 단락 및 코어 사고의 온라인 진단, 고장 관련 증분 전류 기반 돌입 전류 및 CT 포화 시 변압기 권선 간(Turn-to-Turn) 고장 검출 기법이 제시되었다[14-18].

이에 따라, 본 논문은 EMT를 이용하여 변압기 시스템을 모델링한 후, 내부 사고 검출 알고리즘을 제시하고 그 성능을 평가한다.

## 2. 본 론

### 2.1 EMT 기반 345kV 3상 3권선 전력용 변압기

600MVA 345/161/23kV의 Y-Y-△결선 3권선 전력용 변압기를 대상으로 ATPDraw를 사용하여 모델링을 수행하였다. 변압기 시험 데이터만을 이용하여 BCTRAN을 활용하여 R과 L 행렬로 표현되도록 변압기를 모델링하였다. 그림 1은 BCTRAN을 통한 AR 행렬 출력 결과를 나타낸다.



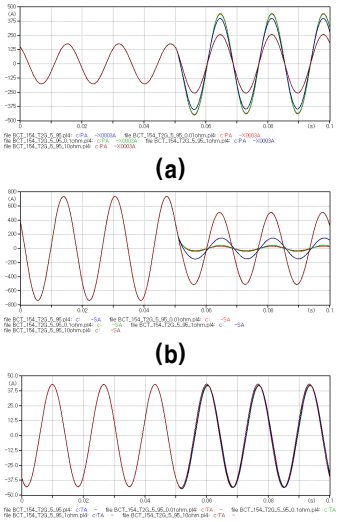

<그림 1> BCTRAN을 통한 AR 행렬 출력 결과

시뮬레이션 결과, 1차측, 2차측, 3차측 전압의 RMS값은 각각 347.531kV, 161.362kV, 23.021kV로서 이론치와는 0.11% 최대오차를 보였다. 그림 2는 정상상태시 유효전력을 나타낸다. 최대오차는 0.36%이었다.

<그림 2> 정상상태시 유효전력

### 2.2 내부 권선 사고 시뮬레이션

그림 3은 고장저항 가변할 경우, Turn-to-earth 사고 시 A상 전류를 나타낸다. 1차측 A상 전류는 고장저항의 증가에 따라, 전류의 크기가 감소하였고, 2차측 A상 전류는 고장저항이 증가에 따라, 전류의 크기가 증가하였으며, 3차측 A상 전류는 사고 발생 이후, 비대칭 전류가 되는 것을 알 수 있었다.



(a)

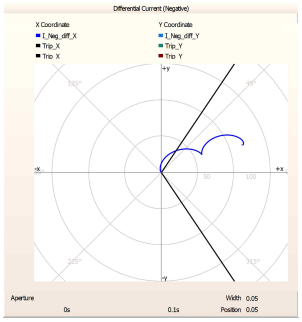
(b)

(c)

<그림 3> Turn-to-earth 사고 시 A상 전류 (고장저항 가변)

### 2.3 내부 사고 검출 알고리즘과 성능 평가

내부 사고 검출 알고리즘은 기본 주파수 역상분 차전류(FFNSDC, Fundamental Frequency Negative Sequence Differential Current)를 기반으로 설계하였다. EMT의 On-Line Frequency Scanner를 이용하여 FFT에 의하여 각 권선과 각 상 전류의 기본파 페이저를 추출한 후, Sequence Filter를 이용하여 1차, 2차, 3차측의 영상분, 정상분, 역상분의 크기와 위상을 계산한 후, 내부 및 외부 사고를 검출하도록 하였다. 그림 4는 고장저항 0.001Ω인 경우, Turn-to-earth 사고 시 역상분 차전류의 궤적을 나타낸다. 정상상태 전류인 0.588mA는 0.05초에 사고 발생 후, 105.725A까지 증가하면서 21.735°로 이동하는 것을 알 수 있었다. 내부 사고 특성 곡선 영역으로 0.0571초에 진입하였으므로 내부 사고가 검출되었다. 한편, 고장저항 0.001Ω인 경우, Turn-to-turn 사고 시 내부 사고 특성 곡선 영역으로 0.0557초에 진입하였으므로 내부 사고가 검출되어 정동작을 보였다.




<그림 4> Turn-to-earth 사고의 경우, 역상분 차전류의 궤적 (고장저항 0.001Ω)

## 3. 결 론

본 논문은 87T의 오동작을 방지하기 위하여, EMT를 이용하여 실 계통 데이터를 근거로 변압기 시스템을 모델링한 후, 기본파 및 역상분 기반 내부 권선 사고 검출 알고리즘을 제시하였고, 성능을 평가하였다.

## [참 고 문 헌]


[1] IEEE Power and Energy Society, “IEEE Guide for Protecting Power Transformers”, IEEE Std C37.91TM-2021, pp. 1-305, 2021.

[2] 이유진, 최종기, 박지환, 조준호, “신재생 연계계통 345kV 변압기 보호신뢰도 진단에 관한 개요”, 2023년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회, pp. 413-414, October, 2023.

[3] 최종기, 이유진, 신성식 외, “EMTP를 활용한 345kV 변압기 후비보호 동작원인 분석 및 대책 사례”, 2021년도 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회, pp. 213-214, March, 2021.

[4] 이유진, 최종기, 박지환, 조준호, “345kV 단권변압기용 보호계전기 실계통 모의시험에 관한 연구”, 2024년도 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1155-1156, July, 2024.

[5] 이지선, 강상희, “철심의 자기포화 특성을 고려한 변류기 모델링 기법에 관한 연구”, 2024년도 대한전기학회 하계학술대회, pp. 759-760, July, 2024.

[6] 김성종, 성병철, 김지홍, “변압기 내부사고 고장전류 해석을 위한 수학적 모델링”, 2016년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회, pp. 179-180, November, 2016.

[7] 정용호, 정규원, 이호용 외, “전력용 변압기 전류비율차동보호계전기 영상보상 필요성 분석”, 2024년도 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1197-1199, July, 2024.

[8] Ji-Sun Lee, Woo-Seok Seo, Sang-Hee Kang, “An Internal Fault Model of a Transformer Bank Using the UDM of Matlab/Simulink”, APAP2023, pp. 50-55, 2023.

[9] 최종기, 이유진, 조준호, “ATP-EMTP를 이용한 단권변압기 내부고장 사례 연구”, 2025년도 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1138-1139, July, 2025.

[10] 윤성민, Peng Y. Lak, 남순열, “디지털트윈 기술을 이용한 전력용 변압기의 차동 보호 오동작 방지에 관한 연구”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 73, no. 12, pp. 2203-2210, December, 2024.

[11] Kai Gan, Ruifeng Zhao, et al., “Current Differential Protection Scheme of ADN Based on Positive Sequence Fault Component”, 2025 IEEE 7th International Conference on Energy, Power and Grid, pp. 291-294, September, 2025,

[12] Nilesh Chothani, Swapnil Kumar, “Enhanced Adaptive Differential Protection using DWT for Transformer Considering CT Saturation”, 2024 3rd International Conference for Advancement in Technology, pp. 1-6, September, 2024.

[13] Gustavo G. Leal H., Guillermo R. Bossio, et al., “Inter-Turn Short-Circuit Detection Through Differential Admittance Monitoring in Transformers”, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 73, 3519508, 2024.

[14] Krzysztof Solak, Klaus Boehme, et al., “ANN Stabilization of Negative-Sequence Integral Protection of Power Transformers for Turn-to-Turn Winding Faults”, 2024 24th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2024.

[15] Bonginkosi A. Thango, “Winding Fault Detection in Power Transformers Based on Support Vector Machine and Discrete Wavelet Transform Approach”, MDPI, Technologies, 2025, 13, 200.

[16] Abdoallah Hosseini,, Mohammad Reza Mahmoudi, et al., “ Multivariate Graphical Analysis of Transformer FRA Signatures: An Integrated Amplitude-Phase Approach for Automated Winding Fault Diagnosis”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, DOI 10.1109/TDEI.2026.3659579, 2026.

[17] Gustavo G. Leal H., Carlos J. Verucchi, et al., “Online Diagnosis of Inter-Turn Short-Circuits and Core Faults in Three Phase Transformers Based on Electrical Indicators”, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, DOI 10.1109/TIM.2026.3662843, 2026.

[18] Pooriya Rashidi, Javad Sadeh, et al., “Transformer turn-to-turn fault detection during inrush current and CT saturation based on fault related incremental currents”, 20th International Conference on Protection and Automation in Power Systems, January, 2026.