

배전선로 고장인지 방식에 관한 연구

이진, 박찬^{ID}

목포대학교 전기공학과

A Study on Improving of Fault Recognition Method in Distribution Line

Jin Lee and Chan Park

Department of Electrical Engineering, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

(Received September 9, 2019; Revised September 11, 2019; Accepted September 11, 2019)

Abstract: The aim of this study is to improve the fault decision ability of FRTU (Feeder remote terminal unit) in DAS (Distribution automation system). FRTU uses the FI (Fault indicator) algorithm based on fault current pickup and operation of the protection device. Even if the inrush current flows or the protection device is sensitive to the transient current, FRTU may indicate incorrect fault information. To address these problems, we propose an improved fault recognition algorithm that can be applied to FRTU. We will detect a specific wave that is indicative of a fault, and use this information to identify a fault wave. The specific wave-detection algorithm is based on the duration and periodicity of the voltage, current, and harmonic variations. In addition, we propose fault recognition algorithms using voltage factor variation analysis and DWT (Discrete wavelet transform). All the wave data used in this study were actual data stored in FRTU.

Keywords: Fault, Wave, FRTU, DWT

1. 서론

전력시스템은 전력수요 증가 및 분산형전원 연계 등의 요인에 의하여 그 규모와 기능의 확장을 필요로 하게 되었다. 시스템의 확장에 가장 중요한 요소는 공급 전력의 신뢰성 확보이다. 따라서 전력시스템의 내부고장이 발생하였을 경우, 고장의 정확한 인지와 신속한 복구는 고장 파급의 효과를 최소화시켜, 시스템의 신뢰성 확보에 가장 중요한 요소가 된다 [1].

배전계통은 배전자동화시스템에 의해 운영되고 있으며, 배전자동화시스템의 구성 요소인 단말장치를 통하여 배전선로의 전압과 전류 및 개폐기 상태를 상시 감시하고 있다. 배전선로에 고장이 발생하면, 단말장치가

이를 인지하여 FI (fault indicator)를 발생시키고, 운영자가 고장구간을 판단한 다음, 계통의 분리와 안정화 조치를 취하는 방식으로 고장의 조치가 이루어져 왔다 [2].

단말장치는 각 상의 전류 RMS 값을 감시하다가 고장전류 설정값(pick up current) 이상의 전류가 흐르고, 보호기기가 동작하여 무전압의 사선상태가 되면 FI를 발생시킨다. 그러나 단말장치는 고장전류와 보호기기의 동작 유무만을 가지고 고장 여부를 판단하기 때문에 고장전류가 저절로 해소되는 돌입성 전류나 보호기기가 과도전류에 민감하게 반응하는 경우에도 이를 고장으로 판단하는 사례가 발생하고 있다. 이러한 오류에 의한 고장정보의 생성은 시스템 운영자의 고장구간 판단과 복구 지연의 원인으로 작용하게 되므로 이를 보완하기 위한 연구가 필요하다 [3,4].

본 연구는 배전선로 고장에 대한 단말장치의 고장 판별능력 개선을 위한 것으로, 단말장치로 유입되는 파형을 분석하여 고장의 징후가 되는 특이파형의 검출 정보 및 웨이블릿(wavelet) 변환과 전압 신호를 이용한

✉ Chan Park; ppchan76@hotmail.com

고장파형의 선별 방법을 제시하고자 한다. 또한, 이를 기존의 단말장치 FI 알고리즘과 결합한 새로운 고장 검출 알고리즘을 제안하여, 단말장치의 운영 신뢰도를 개선하고자 한다.

2. 실험 방법

선로의 고장으로 인지되는 파형은 순간적인 전압과 전류의 변동이 측정되거나, 비교적 장시간 동안 인가되는 고조파 또는 저주파 노이즈에 의하여 선로의 전압과 전류가 이상적인 정현파를 벗어나는 것을 의미한다. 파형의 순시 변동이나 과도상태는 전자에 속하고, 고조파와 과전압 및 저전압 등은 장시간 동안에 발생하므로 후자의 경우에 해당된다 [5,6].

배전선로 고장의 가장 많은 부분을 차지하는 설비 고장의 경우 설비의 열화가 시작되면 계통의 전압과 전류의 파형에 변동이 발생한다. 운영자는 이 상태를 열화의 진전으로 인해 일정 기간 후에 발생하게 될 설비 고장의 징후로 판단할 수 있으며, 이러한 징후는 주기적이고, 지속적이며, 점진적인 형태로 나타나는 것이 일반적이다 [7,8].

그림 1은 실제 배전선로로 부터 취득한 고장이 발생하기 29 Cycle 이전의 파형으로 고장전류로 설정되는 설정값 이하에서도 과도현상은 지속적으로 나타나고 있음을 확인할 수 있고, 이는 고장의 징후로 판단 가능하다.

그림 2, 3, 4는 단말장치에 저장된 파형으로 각 그림의 (a)와 (b)는 전류파형과 전류파형 동기간의 전압파형을 나타낸 것이다.

그림 2(a)는 전류의 값이 800 A 이상이며, (a)와 (b)의 모든 파형에서 전형적인 고장파형의 형태가 잘 나타나고 있다.

그림 3(a)는 전류의 상태가 초기에 최대 740 A의 급격한 과도현상을 보이다가 시간이 경과함에 따라 점차 소멸되는 형태를 보이고, (b)의 전압파형에서는 파형의 변화가 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 이러한



Fig. 1. Current wave changes before fault.

형태의 파형은 고장이 아닌 돌입성 전류에 의한 결과로 해석할 수 있다.

그림 4는 고장과 돌입의 형태가 혼재되어 있는 파형이다. 이러한 파형은 현재의 단말장치 FI 알고리즘으로는 고장의 정확한 판단이 어려우므로 이를 보완하기 위해서는 개선된 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 단말장치가 보유하고 있는 FI 알고리즘에 특이파형 검출 정보를 연계하고, 특이파형 검출 정보가 없는 고장파형에 대해 전압 파형의 변동 정보와 전류 파형에 대한 웨이블릿 변환을 이용한 고장파형 판별 알고리즘을 제안한다.

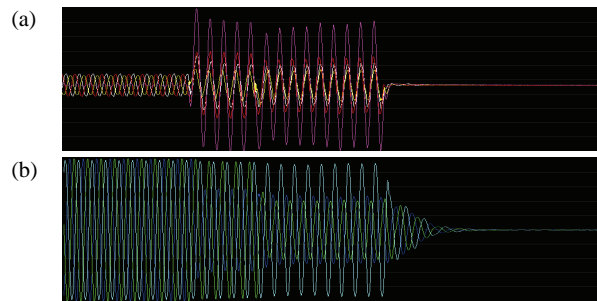


Fig. 2. Fault wave.

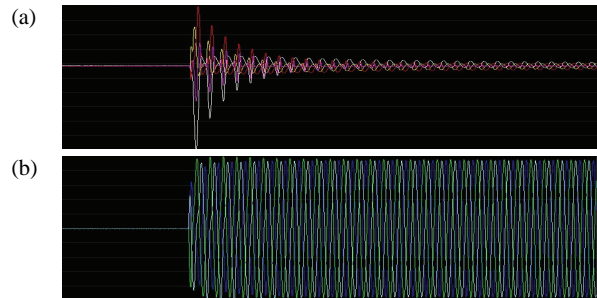


Fig. 3. Inrush wave.

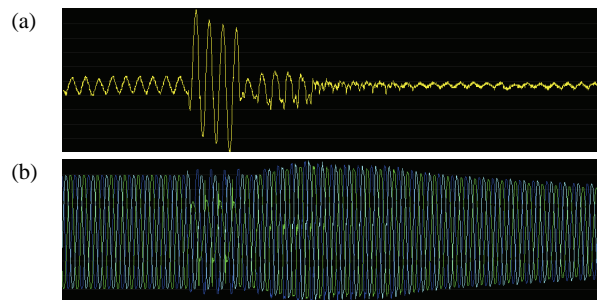


Fig. 4. Mixed wave of fault and inrush.

3. 결과 및 고찰

3.1 고장징후 검출을 위한 특이파형 취득

단말장치로 유입되는 파형으로부터 특이파형을 검출하기 위한 방법으로는 정상 상태와 비교한 샘플단위 전압과 전류의 변화 및 순간전류와 고조파 함유율 변화의 지속성과 주기성을 이용하는 방법이 있다. 이는 고장이 발생하기 이전의 파형에서 순간적인 크기 변화가 일정한 주기로 반복하여 발생하면 고장의 징후가 되는 특이파형으로 판단하여 그 파형을 검출하는 것이다 [9].

본 연구에서는 특이파형 검출 알고리즘이 적용된 실제 배전선로의 단말장치로 부터 취득한 고장파형 182개, 돌입성 파형 14개 및 특이파형의 형태를 나타낸 29개의 파형을 새로운 알고리즘에 적용하여 고장 판별 능력 검증에 이용하였다.

3.2 전압요소를 이용한 단말장치 고장파형 판별

현재 단말장치의 FI 알고리즘은 본 논문의 서론에서 언급하였듯이 설정값 이상의 전류 및 보호기기의 동작 여부에 따라 고장을 검출하는 방식으로 고장검출 오류의 가능성을 내재하고 있으므로, 본 연구에서는 전류의존형 고장검출 알고리즘에 전압 요소에 대한 비교 단계를 추가하고자 한다.

전압요소를 고려한 고장판별 방법은 고장발생 시 전압의 크기 및 THD (total harmonic distortion)가 국부적으로 증가와 감소를 반복하는 양상을 보이는 것에 기반하는 것으로, 단말장치가 3상 전압파형을 감시하여 고장전류 파형과 동상 및 동일 주기의 전압 파형에 크기 또는 고조파 왜형률(THD)에 변화가 발생 하면 단말장치가 고장을 검출하도록 하는 것이다. 그러나 N상의 고장전류 또는 돌입성 전류 등에 의한 경우에는 전압 요소가 고장검출에 활용될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 전압의 변화를 통한 고장의 검출이 어려운 경우에도 적용이 가능한 웨이블릿 변환을 이용한 고장전류 검출 방법을 추가로 제안한다.

3.3 웨이블릿 변환을 이용한 고장파형 판별

웨이블릿 변환은 신호의 다중 scale 표현과 분석을 위하여 적용되어 왔다. 웨이블릿 변환은 마더 웨이블릿 (mother wavelet)을 정의하고 마더 웨이블릿을 크기 확장(scaling)과 시간이동(time shifting)을 통해 웨이

블릿 신호로 구성하여 신호를 분해한다. 즉, 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용하여 높은 주파수 대역에서는 분해능이 낮고, 낮은 주파수 대역에서는 분해능이 높은 다중분해 특성을 가지고 있다. 따라서 기본파 성분에 대한 정보의 유지와 과도요소의 정확한 검출이 가능하다. 이산 웨이블릿 변환은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$DWT(n,k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) g\left(\frac{k-nb_0a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 $g(n)$ 은 마더 웨이블릿, $x(n)$ 은 입력신호, scaling 및 이행(transient) 파라미터 a 와 b 는 파라미터 m 의 함수이다 [10].

본 연구는 단말장치에 입력되는 전류파형에 대하여 고장파형과 가장 유사한 형태의 마더 웨이블릿을 선정하고, 이산(discrete) 웨이블릿 변환을 이용하여 1단계(level)까지 파형에 대한 각 주기 단위의 웨이블릿 계수값을 추출한 다음, 이를 고장파형 판별에 이용하였다. 이산 웨이블릿 변환을 사용한 이유는 단말장치의 연산량을 고려하였기 때문이다. 전류의 파형은 유사도에 따라 계수값이 크게 나타나고, 이 계수값의 변화 정도는 고장파형을 판별하기 위한 명확한 기준으로 사용이 가능하다 [11,12].

최적 마더 웨이블릿의 선정을 위해 과거 고장검출 연구들에서 자주 사용되었던 8가지 마더 웨이블릿을 대상으로 각각의 이산 웨이블릿 변환 결과를 신경회로망에 학습시키고, 학습 목표값 오차 및 학습에 사용하지 않은 비학습 데이터에 대한 출력 오차를 계산한 다음, 그 오차가 최소가 되는 웨이블릿을 마더 웨이블릿으로 선정하였다. 신경회로망은 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 계수들을 입력요소로 하여 입력층 18개, 은닉층 32개로 구성된 2개층과 출력층 1개의 구조로 구성하였으며, 출력 활성화함수는 비선형이며, ± 1 (고장파형: -1, 돌입성파형: 1)의 출력값을 갖는 hyperbolic tangent 함수를 적용하였다.

표 1은 각 마더 웨이블릿에 대한 학습 결과이다. 결과에서 나타나듯이 신경망 학습에 대한 오차 및 비학습 데이터에 대한 오차가 가장 작은 db4를 마더 웨이블릿으로 선정하였고, 이를 고장파형 판별 알고리즘에 이용하였다. 고장파형 판별 시 db4를 이용 이산 웨이블릿 1단계(level) 분해를 통해 고조파 영역인 D1의 각 주기 계수값을 추출하고, 과도현상 발생 시점부터 5주기 동안 계수값이 설정치 이상으로 유지되는 경우 고장파형으로 판별하도록 하였다. 설정치는 마더 웨이

Table 1. Mother wavelet for wave analysis.

Mother wavelet	Learning error (Target= 10^{-4})	Output error (Non-learning)
db2	0.065951/1e-04	18.47%
db4	0.020864/1e-04	11.38%
db8	0.095396/1e-04	17.89%
db10	0.028418/1e-04	12.55%
bior1.1	0.089853/1e-04	19.87%
bior3.1	0.035927/1e-04	13.98%
sym5	0.021541/1e-04	11.84%
sym8	0.090134/1e-04	19.92%

릿 선정을 위한 학습 결과 데이터를 참고하여 0.1로 지정하였다.

3.4 고장파형 판별 알고리즘 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 특이파형 및 전압요소와 웨이블릿 변환을 이용한 고장검출 알고리즘의 고장검출 조건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 고장의 징후인 특이파형이 발생하였고, 전류가 단말장치 설정 pick-up 이상인 경우
- 2) 전류가 단말장치 설정 pick-up 이상이며, 전압파형에 크기 및 THD 변화가 발생한 경우
- 3) 전압파형의 크기와 THD 변화는 없으나, 전류가 단말장치 설정 pick-up 이상이며, 이산 웨이블릿 변환을 통한 판단 결과가 고장인 경우

알고리즘의 실효성 검증을 위해 특이파형 검출 시 활용하였던 196개 고장파형과 돌입성파형을 알고리즘에 적용하였다. 고장이 발생하기 전 130 cycle 내에서 특이파형이 검출되었던 29개 단말장치에 저장된 고장파형에 대해 파형분석과 현장에서 취득한 고장정보를 비교하여 29개 파형 모두가 실제 고장으로 확인되었으며, 이는 고장검출 조건 1에 해당한다.

특이파형이 검출되지 않은 167개 고장파형은 고장검출조건 2와 3에 대하여 검증을 시행하였다.

그림 5(a)는 C상의 고장전류 파형이며, (b)는 전압파형이다. 전류에서 pick-up을 초과하는 900 A 이상의 고장전류가 일정기간 지속되고, 동일 주기의 3상 전압파형에서 크기 및 고조파의 변화가 나타나고 있어, 이는 고장검출 조건 2에 의해 고장으로 판별되었다.

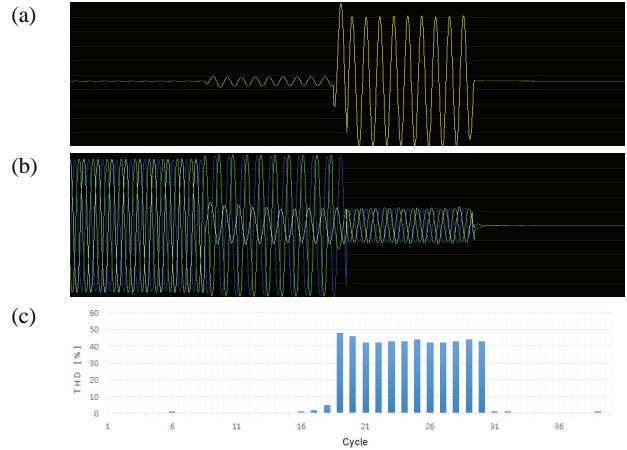
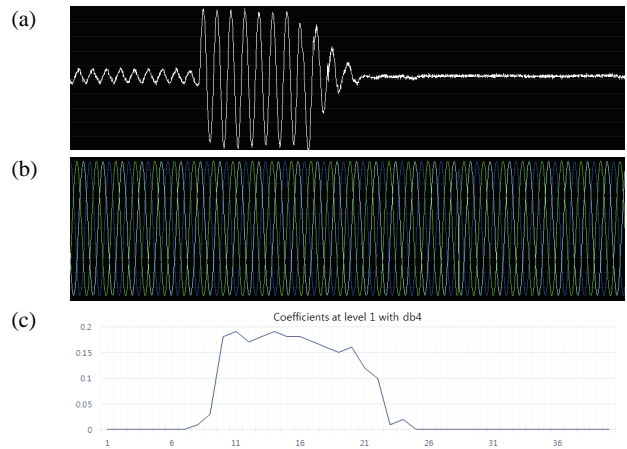
**Fig. 5.** Fault decision case 1.**Fig. 6.** Fault decision case 2.

그림 6(a)는 단말장치가 고장으로 판단한 N상의 전류파형으로, 고장과 돌입의 특징이 혼합된 형태이며, (b)의 전압파형에는 크기 및 고조파의 변화가 나타나지 않았다. 각 주기별 웨이블릿 변환 및 계수 변화를 확인한 결과 (c)와 같이 파형의 과도시점 이후 계수가 10 cycle 이상 설정치를 초과하여 알고리즘은 고장파형으로 판별하였다. 이는 고장검출 조건 3에 부합하며, 이를 통해 전압의 변화가 없는 N상 고장의 경우에도 웨이블릿 변환을 이용하여 정확한 고장검출이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

단말장치의 고장검출 오류 가능성을 보완하고, 검출능력 개선을 위한 고장파형의 판별 방법을 제시하였다.

고장 발생 이전의 특이파형에서 고장의 징후가 검출된 경우는 약 15%이고, 고장의 징후가 나타나면 모두가 고장으로 이어짐을 확인할 수 있었다.

전압의 변동 및 이산 웨이블릿 변환을 이용한 알고리즘을 통해 고장파형의 판별을 수행한 결과, 고장 인지율 94.7%를 얻어, 기존 단말장치의 고장 인지율 대비 15.8%의 고장판별 능력 개선이 가능함을 확인하였다.

이상의 결과로부터 제안한 알고리즘이 단말장치의 고장판단 오류를 감소시키고, 배전계통 운영 신뢰도 향상에 도움이 될 수 있을 것으로 판단한다.

ORCID

Chan Park

<https://orcid.org/0000-0002-3194-7470>

REFERENCES

- [1] Y. Tang, *IEEE Trans. Power Syst.*, **11**, 181 (1996). [DOI: <https://doi.org/10.1109/59.486711>]
- [2] Y. J. Ma, D. X. Wang, and X. S. Zhou, *Appl. Mech. Mater.*, **727**, 835 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4208/www.scientific.net/amm.727-728.835>]
- [3] J. S. Suh, H. S. Kim, S. I. Lim, M. S. Choi, and S. J. Lee, *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, **63**, 1354 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2014.63.10.1354>]
- [4] Y. S. Ko, T. K. Kang, H. Y. Park, H. Y. Kim, and H. S. Nam, *IEEE Trans. Power Del.*, **25**, 1001 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2009.2032051>]
- [5] B. A. Adegboye, *Adv. Mat. Res.*, **62**, 53 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.62-64.53>]
- [6] B. Gou, C. Luo, and F. Ponci, *IEEE Trans. Power Syst.*, **21**, 1874 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2006.882459>]
- [7] C. W. Lim and S. K. Han, *J. Korean Data Inf. Sci. Soc.*, **29**, 779 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.7465/jkdi.2018.29.3.779>]
- [8] J. Liang, Z. Yun, F. Liu, and Y. Liu, *Proc. International Conference on Power System Technology* (IEEE, Kunming, China, 2002) p. 1-6. [DOI: <https://doi.org/10.1109/icpst.2002.1047264>]
- [9] J. Lee and C. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 151 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.2.151>]
- [10] Y. B. Jung, Y. H. Jung, K. S. Kim, B. S. Lee, and S. C. Bae, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **62**, 155 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.2.155>]
- [11] M. N. Bogar and C. K. Jambotkar, *Int. J. Recent Trends Eng. Res.*, **4**, 98 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.23883/ijrter.2018.4015.9uoew>]
- [12] S. Li, F. Lv, and C. Fu, *Adv. Mat. Res.*, **591**, 2127 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.591-593.2127>]