

배전선로의 특이파형 검출 방법에 관한 연구

이진, 박찬^{ID}

목포대학교 전기공학과

A Study on Detection Method of Specific Waveform in Distribution Line

Jin Lee and Chan Park

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

(Received December 15, 2018; Revised January 17, 2019; Accepted January 17, 2019)

Abstract: The aim of this investigation is to detect specific waveforms in a distribution line prior to the occurrence of a fault. Conditions were introduced such that a feeder remote terminal unit (FRTU) of the distribution automation system selects and stores fault waveforms from the different waveforms detected in the distribution line. In addition, an algorithm was developed to detect specific waveforms from the fault waveforms stored using the FRTU. This algorithm exploits the duration and periodicity of harmonic changes in voltage and current. The efficacy of the algorithm was confirmed based on the measurements of fault waveforms in an actual distribution line. The results indicated that faults in a distribution line can be predicted via experimental measurements.

Keywords: Distribution, Waveform, Detection, FRTU

1. 서론

배전계통의 규모 확대에 의한 배전망의 변동요인 증가는 배전선로의 전력품질 불안정을 가져왔고, 지금까지의 배전계통 운영은 주상차, 단말장치(feeder remote terminal unit, FRTU), 통신장치 등으로 구성된 배전 자동화시스템(distribution automation system)을 이용하여 고장을 감시하며, 고장이 발생하면 현장에 설치된 보호기기를 통해 사고구간을 분리한 다음, 고장설비의 사후 복구를 통해 계통을 안정화시키는 방식으로 운영되어 왔다. 그러나 불시에 발생하는 계통의 사고에 대한 예방은 매우 어려워, 이 문제를 해결하기 위한 배전설비의 고장예측의 필요성이 증대되고 있다 [1].

본 연구는 배전설비 고장으로 인한 배전선로에 고장이 발생하기 이전에 발생하는 특이파형을 검출하기 위한 파형의 취득과 선별에 대한 기준을 정의하고 이를 배전설비 고장 예측에 활용하고자 하는 것이다.

2. 실험 방법

2.1 파형의 해석

배전선로에 고장이 발생하면, 보호기기인 리클로저(recloser)와 다회로 차단기(MCB) 등이 고장을 검출하고 동작하여, 전원 측으로부터 고장구간으로 유입되는 전력을 차단한다. 고장은 선로의 전압과 전류가 이상적인 정현파를 벗어나는 것을 의미한다. 순간적인 전압, 전류의 변동이나 비교적 긴 시간 동안의 고조파 혹은 저주파 노이즈 등이 이에 해당하며, 순시전압의 변동(sag, swell, interruption)이나 과도상태전압(transient)은 전

✉ Chan Park; ppchan76@hotmail.com

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

자에 속하고, 고조파(harmonic)와 과전압 및 저전압 등은 장시간 동안에 발생하므로 후자에 속한다고 할 수 있다 [2,3].

따라서 선로의 정상 상태와 고장에 의한 비정상 상태의 파형을 조사 비교한 다음, 그 상태를 분석하여 고장의 예측이 가능한 특이파형의 검출이 가능하다면 설비의 사전 교체 등을 통하여 계통의 사고를 예방하는 데 많은 도움을 줄 것이다.

배전선로의 파형 취득은 배전자동화시스템 단말장치 DSP (digital signal processing)부에서 처리한다. 단말장치 서지보드의 CT와 PT를 통하여 얻어진 선로 전류의 값(A, B, C, N 상)과 전압의 값(A, B, C 상)을 노이즈필터인 low-pass filter를 거쳐 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한 다음, 이 신호를 단말장치의 마이크로프로세서에서 주기마다 128회씩 sampling하여 FFT로 변환한다. 변환된 FFT는 real 값과 image 값으로 분리된 후, RMS 연산을 통하여 구해진 크기와 위상 값을 단말장치에 저장하고, 배전자동화시스템의 주장치에 전송함으로써 배전선로에 발생한 파형을 확인할 수 있다 [4,5].

그림 1은 배전자동화시스템 단말장치(FRTU)를 통하여 배전선로로부터 취득한 전류 파형을 나타낸 것이다.

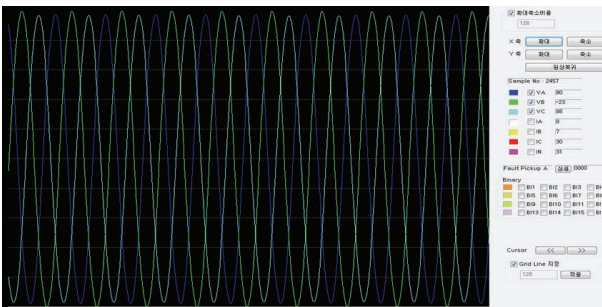


Fig. 1. Normal waveform.

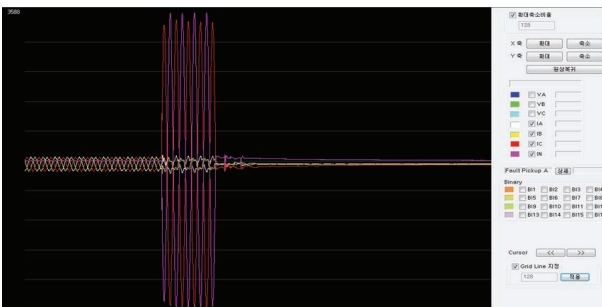


Fig. 2. Fault waveform.

검출된 전류의 파형은 일정한 형태의 값을 유지하고 있으며 돌발적인 피크가 나타나지 않았다. 따라서 3상의 위상과 pick-up 전류가 정상범위를 초과하지 않는 정상 전류의 파형임을 알 수 있다.

그림 2는 배전계통에서 단락고장이 발생하였을 경우의 전류 파형이다. 그림 1의 정상상태 파형과 비교하여 중간 부분부터 전류의 크기와 파형이 변화하고 있으며, 파형의 변화는 배전선로에 고장이 발생하였음을 의미한다 [6].

그림 1과 그림 2의 비교에서 나타나듯이 선로의 고장이 일어나면 전압과 전류의 파형에 변동이 발생한다. 따라서 고장 발생 전 파형의 크기 변화와 변화의 주기성 및 지속성 등을 실시간 감시하면 고장의 징후를 나타내는 특이파형의 검출이 가능할 것으로 생각된다.

2.2 고장파형의 저장

단말장치는 저장용량이 제한적이므로 배전선로로부터 취득되는 모든 파형의 저장이 불가능하다. 따라서 단말장치는 일정한 기준 이상의 파형이 발생하였을 경우에만 파형 데이터를 저장할 수 있도록 설계되어 있다. 단말장치의 파형 저장 기준은 고장전류가 pick-up 기준을 초과하고 보호기기인 차단기(CB)와 리클로저(R/C) 등이 개방되는 경우와 고장전류가 pick-up 기준을 초과하고 비선형 전류변화가 감지되는 경우 및 1분간의 실효치 파형에 대한 N상의 전류가 기준치 이상을 일정 시간 동안 초과하는 경우로 규정하고 있다 [7].

고장전류의 pick-up 기준은 과전류나 이상전압을 그 대상으로 한다. 단말장치 FI (fault indicator)의 설정 기준(상전류 400 A, 지락전류 200 A 등) 전류와 sag나 swell의 기준전압 및 비선형전류의 변화량을 기준으로 하여, 기준 값을 초과하면 이상 상태로 분류하고 이 정보를 저장한다. 또한, 추출한 전류의 파형이 전주기의 동일위치 전류 값과 비교하여 1주기의 기간 동안 10% 이상의 변화가 일어나면 이것을 이상 상태로 분류한다. 변화량은 1주기 기간 동안의 전체 전류 면적의 합계(각 샘플의 절대치의 합) 비교로 계산이 가능하다.

중성선인 N상의 전류 기준치는 N상의 전류가 40 A 이상이고, 3상 평균전류 대비 N상의 전류가 25% 이상이며, 그 상태가 1초 이상 지속되는 경우를 저장 조건으로 하고 있다.

고장파형은 상기의 기준에 따라 단말장치에 저장되는데, 본 연구에서는 고장파형 중 특이파형을 검출하기 위하여 기존의 4개인 고장파형 저장 공간에 3개에 고

장파형을 저장하고, 나머지 1개에는 소규모 특이파형 5개가 저장되도록 하였으며, 그 동작을 단말장치 메모리에 할당하도록 설계하였다.

고장파형의 저장시간은 기존의 경우 고장 전 20 cycle, 고장 후 120 cycle, 고장 제거 후 20 cycle 등으로 구분하여 160 cycle의 파형을 저장하였으나, 본 연구에서는 고장 이전의 징후를 포착하기 위하여 그림 3과 같이 고장 이전 파형의 저장주기를 확대하여 고장 전 130 cycle과 고장 후 30 cycle로 분할하여 파형을 저장하도록 하였다.

특이파형은 그림 4와 같이 고장파형의 1/5 길이로 임펄스 전 15 cycle (64 sampling)과 임펄스 후 17 cycle (64 sampling)의 총 32 cycle (128 sampling)을 저장하도록 설계하였다. 이 방법은 기존의 방법과 비교하여 고장파형 1개의 저장 공간에 5개 파형 저장을 가능하게 한다. 또한, 전압의 sag와 swell 파형을 저장할 수 있도록 별도의 저장 공간을 할당하도록 단말장치의 프로그램을 수정 적용하였다.

1분간의 실효치 파형의 저장은 실효전류의 파형을 매 cycle당 1회의 3상전류 실효치 값을 저장하여 파형 데이터로 사용하였으며, 파형의 추출시간은 1분을 기준으로 하였다. 이 방법은 기존의 방식과 비교하여 저장시간의 증가와 sampling 영역 및 저장 채널의 감소를 가져왔다. 저장시간은 22.5배 증가(160 cycle →

3,600 cycle)를 가져왔고, 샘플링 영역과 저장 채널은 각각 1/64과 3/7로 감소하여 기존의 파형 1개 저장 공간에 6.6개의 1분간 실효치 파형의 저장이 가능하게 되었다. 기존 대비 저장 채널의 감소량은 아래의 식 (1)로 얻을 수 있다.

$$3\text{상 전류}/(4\text{상 전류}+3\text{상 전압}) \quad (1)$$

위에서 설명한 실효치 파형의 저장 조건과 더불어 선로의 차단기(CB)가 선로를 차단한 이후 trigger 상황이 발생하면, 차단기의 차단 시점을 포함하여 실효치 파형을 저장하도록 하였다. 또한, 통신 전송시간의 확보 및 과도 알람의 발생을 피하기 위한 여유시간의 확보가 필요하므로 고장의 상황이 지속되더라도 1분 저장, 1분 휴식, 1분 저장, 1분 휴식을 반복하게 하여 여유시간을 확보하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

단말장치를 통한 고장파형의 저장과 특이파형의 검출 여부를 확인하기 위해 실제의 배전선로에서 운용 중인 단말장치 1,194대에 대해 검출 알고리즘을 적용하였고, 검출 알고리즘이 적용된 단말장치로부터 취득한 196건의 고장파형을 그 사례로 하여 표 2와 같이 고장의 형태를 분류하고, 그 파형을 분석하였다.

배전선로로부터 단말장치를 통하여 저장된 고장파형으로부터 특이파형을 검출하기 위한 알고리즘은 다음과 같이 설계하였다. 알고리즘은 표 1과 같이 정상파형과 비교한 샘플단위의 전압, 전류의 변화 및 순간전

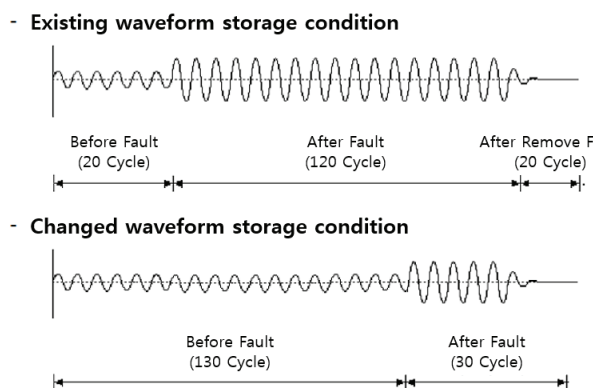


Fig. 3. Waveform storage period before and after fault.

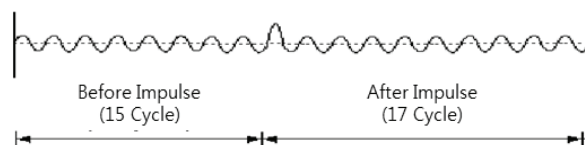


Fig. 4. Waveform storage period before and after impulse.

Table 1. Fault cases in distribution line.

Fault case	Number	Remarks
Equipment	23	LP insulator, arrester, COS etc.
Device	12	Transformer, switch etc.
Cable	60	
Others	101	

Table 2. Specific waveform classification.

Specific wave detection type	Period	Data sampling
Voltage and current changes	1 cycle	128 sample
Instantaneous variations	1 cycle	RMS
Harmonic variations (V, I)	1 cycle	128 sample
3 harmonic content rate (V, I)	1 cycle	128 sample

류와 고조파 함유율 변화의 지속성과 주기성을 고려하였으며, 고장이 발생하기 이전의 전압 또는 전류에 순간적인 크기 변화가 일정한 주기로 발생하면 고장의 징후가 되는 특이파형으로 판단하여 그 파형을 검출하도록 하였다.

기준파형은 샘플 단위 비교 값의 차이가 기준이 되는 값(10%) 이상 발생하는 시점의 직전 cycle로 설정하고, 해당 cycle별로 기준파형과의 샘플단위 차이가 기준 값 이상 발생하는 경우 count를 증가시키고 (1회 이상/cycle → 1 count), 해당 count가 연속 3회 미만으로 발생하면 카운트를 reset 시킨다. 해당 count 내에서 block count 이상이 발생하면 부하의 변동으로 인식하고, count를 reset 한다. 샘플 단위의 비교에서 기준 값 이상의 차이가 연속 3회 이상으로 일어나면 특이파형으로 판별한다. 그림 5는 정상파형과 비교하여 특이파형의 전압과 전류 변화 형태를 감시하는 과정을 보여주는 것이다.

순간전류의 변화량은 전류 RMS 값의 비교를 통하여 검출이 가능하다. 128 sample의 상시 cycle 단위를 기준으로 전류 변화 전과 후의 값을 비교한 다음, 전류의 변화량이 기준 이상으로 증가하면 해당 cycle로 부터 count를 증가시키기 위한 감시를 시작한다. 전류의 정상파형에서 순간적인 전류의 변화가 검출되면, 전류의 변화가 발생하는 시점부터 3 cycle을 감시하며, 이후 전류 변화율이 감소하면 특이파형으로 판별하고 count를 증가시킨다. 특이파형이 지정된 시간(reset time: 180 분) 이내에 3회 이상 count 되면 특이파형으로 판별하고, 마지막 시점의 총 20 cycle 파형을 저장한다. 그림 6은 전류 순간변화량을 감시하는 과정을 보여주는 것이다.

고조파의 함유율(THD)은 아래의 식 (2)와 (3)에 의하여 매 cycle 단위로 고조파 연산(1~31차)을 수행하며 그 연산 값이 기준 값(1고조파 90% 미만, 3고조파 10% 이상) 이상으로 증가하면 해당 cycle로부터 count 증가를 위한 감시를 시작한다.

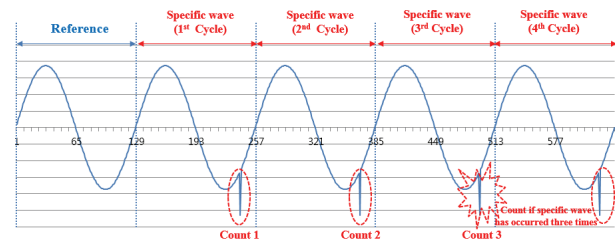


Fig. 5. Voltage and current changes monitoring.

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{31}^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{31}^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3)$$

그림 7은 고조파 함유율을 감시하는 과정을 나타낸 것으로 고조파 함유율의 변화가 일어나는 발생 시점부터 변화 count를 감시하며, 지정된 시간(reset time: 180 분)이 지나면 count를 reset 한다. 해당 파형이 지정된 시간 이내에서 3회 이상 count 되면 마지막 시점의 총 20 cycle의 파형을 저장하고 특이파형으로 판별한다.

실험의 결과, 표 3과 같이 196건의 고장사례에서 pick-up 기준을 초과하여 비정상 형태를 보인 고장파형 182건이 저장 기준에 의해 단말장치에 저장되었고, 저장된 파형 중에서 29건이 특이파형으로 분류 검출되어 고장파형 저장 및 특이파형 검출 알고리즘이 정상적으로 동작했음을 확인할 수 있었다.

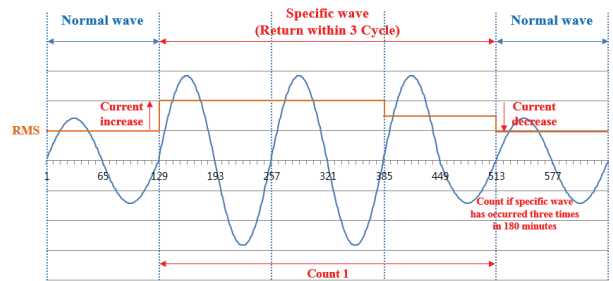


Fig. 6. Current instantaneous variation monitoring.

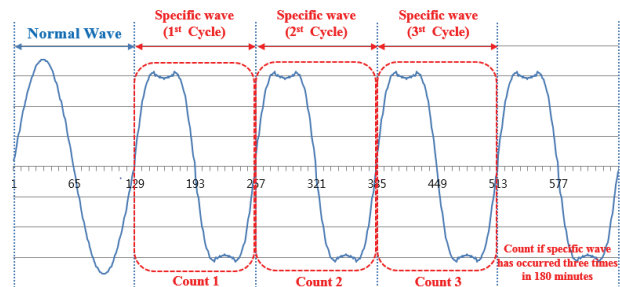


Fig. 7. Harmonic changes monitoring.

Table 3. Detect result of fault and specific waveform.

Detect type	Equipment	Device	Cable	Others
Fault wave	19	12	60	91
Specific wave	-	1	28	-

저장된 고장파형 데이터를 활용한 고장 발생 전후의 특이파형 검색에서 그림 8의 (a)는 LP 애자, (b)는 피뢰기의 고장파형으로 피뢰기와 LP 애자 고장의 경우 완전 절연 파괴(차단기 동작 시작) 시점에서 급변하는 전압과 전류에 비해 고장이 발생하기 이전에 발생하는 누설전류 값이 mA 수준으로 매우 작고 지속시간이 짧아 특이파형이 검출되지 않았으나, 지중케이블 케이블 소손과 기기 불량에 의한 고장에서는 고장이 발생하기 이전 구간에서 고장의 징후로 해석 가능한 특이파형이 관찰되었다.

그림 9는 지중케이블 불량에 의한 고장파형으로 샘플 단위 전류 변화분에 의해 특이파형이 검출된 사례이다. (a)는 고장 발생 이전에 20 cycle 간격으로 2회

의 전류 값의 변화(50 A → 5 kA)가 발생하였고, (b)의 경우에는 고장 발생 전 1 cycle 간격으로 지속적인 전류 값의 변화(28 A → 174 A)가 발생하였음을 확인할 수 있다.

그림 10의 (a)와 (b)도 지중케이블 불량에 의한 고장 파형이며 순간전류 변화분에 의해 특이파형이 검출된 사례이다. (a)의 경우 고장 발생 이전에 7 cycle에 걸쳐 고장의 징후가 되는 순간적인 전류 값의 변화(2 A → 198 A)가 기준 값(부하전류 30 A 미만일 경우 변화율 30% 이상) 이상, (b)의 경우도 고장이 발생하기 이전에 순간적인 전류 값의 변화(54 A → 103 A)가 기준 값(부하전류 30 A 이상일 경우 변화율 10% 이상) 이상 지속적으로 나타나, 순간전류 변화율에 의한 특이파형의 검출 기준에 따라 특이파형으로 분류 검출되었음을 확인할 수 있다.

그림 11은 가공용 변압기 권선 불량에 의한 고장이

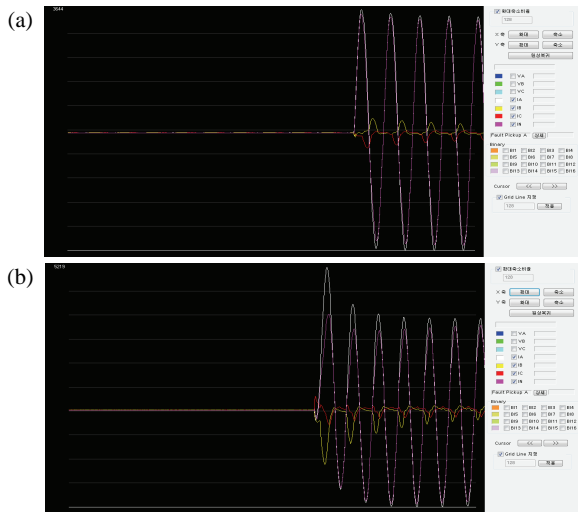


Fig. 8. Fault waveform of LP insulator and arrester.

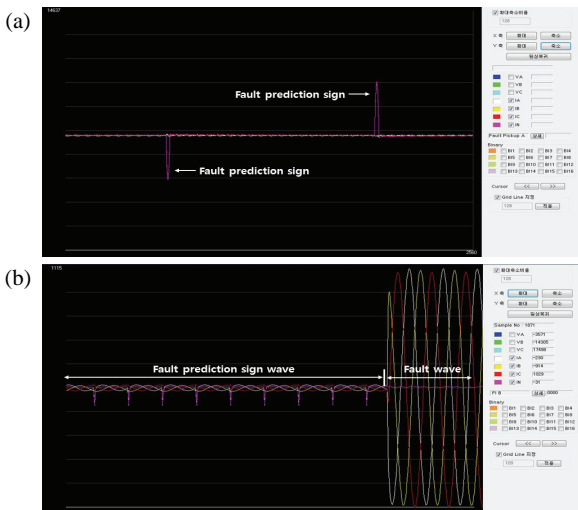


Fig. 9. Current waveform changes before cable fault.

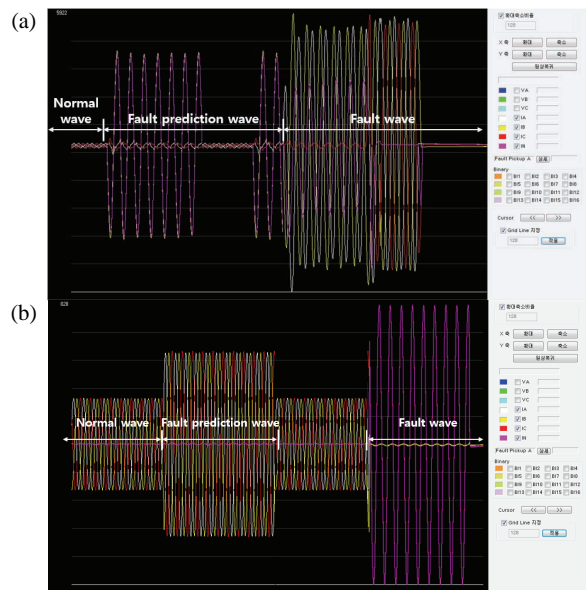


Fig. 10. Current instantaneous variations before cable fault.

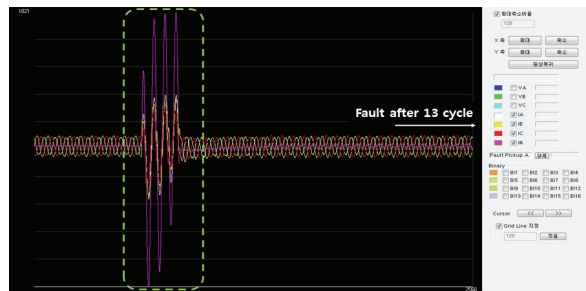


Fig. 11. Waveform before transformer fault.

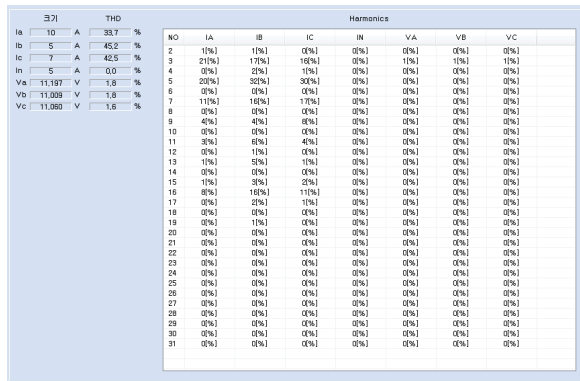


Fig. 12. Harmonic content rate of fault waveform.

발생하기 전 파형으로 파형의 크기 변화 및 파형의 왜곡 등을 통해 고장의 징후로 판단 가능한 파형의 변화를 확인할 수 있으며, 그림 12는 그림 11의 파형에 대한 고조파 함유율(THD)의 변화를 감시한 결과로 전류의 고조파 함유율이 3차 21%, 5차 32%, 7차 17%, 16차 16%로 3고조파 함유율 10% 이상이 4회로 고조파 함유율 변화에 따른 특이파형의 취득 조건인 3회 이상에도 부합하였음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 배전선로의 고장 예측을 위한 것이다. 선로의 고장 전 징후를 나타내는 특이파형의 검출과 분석을 통한 고장의 사전 예측 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 정상파형과 특이파형의 분류를 위한 기준의 설정이 필요하고, 그 기준을 설정하였다.
 - 전압, 전류 파형의 순간 변화 및 주기성
 - 전류 파형의 Peak값 전체 변화 및 지속성
 - 전압, 전류 파형의 고조파 함유 변화 및 주기성

- 2) 케이블 고장 사례에서와 같이 고장 전 특이파형을 나타내는 고장의 경우 본 연구에서 제시한 검출 기준에 의해 특이파형 검출이 가능하고, 이를 통해 배전설비 고장의 사전 인지가 가능하다고 판단되었다.

본 연구는 고장 예측에 관한 파형의 분석법을 제시하고 이를 선로의 고장 예측에 활용하고자 하였다. 향후 배전설비에 다양한 IoT 센서의 적용을 통한 특이파형 검출 범위의 확대와 취득된 파형에 대한 빅데이터 분석기법이 적용될 경우 더욱 정확한 고장의 사전 예측이 가능하게 될 것으로 생각한다.

ORCID

Chan Park

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

REFERENCES

- [1] 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/tpwrd.2009.2032051>]
- [2] J. S. Seo, H. S. Kim, S. I. Lim, M. S. Choi, and S. J. Lee, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **63**, 1354 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2014.63.10.1354>]
- [3] B. Gou, C. Luo, and F. Ponci, *IEEE Trans. Power Syst.*, **21**, 1874 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2006.882459>]
- [4] J. Liang, Z. Yun, F. Liu, and Y. Liu, *Proc. International Conference on Power System Technology (IEEE, Kunming, China, 2002)* p. 2635.
- [5] P. Mao, J. Wei, and B. Chen, *Proc. 2006 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2006)* (IET Conference Publications, Beijing, China, 2006) p. 335-339.
- [6] L. Li, *Adv. Mat. Res.*, **614**, 1833 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.614-615.1833>]
- [7] Y. S. Ko, *J. Electr. Eng. Technol.*, **3**, 192 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2008.3.2.192>]