

A Study on High Impedance Fault Detection In Power System

任化永* 柳昌完** 高載虎***
 (Wha-Yeong Yim · Chang-Wan Ryu · Jae-Ho Ko)

Abstract - The analysis of distribution line faults is essential to the proper protections of the power system. A high impedance fault does not make enough current to cause the appropriate action of conventional protective devices. From a staged high impedance fault test, which was carried in Korean electric power systems, it was found that a arcing phenomenon occurred during the high level portion of conductor voltage in each cycle. In this paper, we propose a new method for detection of high impedance faults, which uses the arcing fault current difference during high voltage and low voltage portion of conductor voltage waveform. To extract this difference, we divided one cycle fault current into equal spanned four data windows according to the magnitude of voltage waveform and applied fast fourier transform(FFT) to each data window. The frequency spectrum of current waveform in each portion are used as the inputs of neural network and is trained to detect high impedance faults. The proposed method shows improved accuracy when applied to staged fault data and fault-like loads.

Key Words : High impedance fault, High impedance fault detector, Backpropagation, FFT

1. 서 론

전력 계통에서 고저항 고장(High Impedance Fault : HIF)은 고장 전류가 작은 아크성 특징 때문에 고장 전류의 크기에 의존하는 기존의 계전 방식으로는 검출이 불가능하다. 특히, 3상 4선식 다중접지 방식인 우리 나라와 같은 배전 선로에서의 고저항 지락 사고는 고장 전류와 부하 전류와의 구별이 어려운 문제점이 있다, 따라서 이러한 문제점을 해결해 보려는 많은 연구가 진행되어 왔다.

고조파 전류신호의 증가를 검출해내는 방법[1], 3조파, 5조파, 7조파 성분의 증분 및 위상각 변화를 측정하는 방법[2], 고장 전류 패턴을 신경 회로망에 학습시킨 연구[8,9] 등이 그 예이다. 건전한 전력계통에서도 부하의 특성에 의해 고조파 전류가 흐르고, 선로의 개폐시 선로정수에 의해 고조파 전류가 발생하기도 한다. 건전한 선로의 고조파 전류와 아크 지락 고장전류를 어떻게 구별하느냐가 관건이 되고 있으나 현재까지 완벽한 해결책은 없는 실정이다.

본 논문에서는, 건전 선로에서 고조파 전류의 발생과 진행은 선로 전압 파형의 높고 낮은 순간에 상관없이 동적 특성을 지니고 있으나 아크 지락전류는 전압 파형의 파고치 부근에서 발생하는 점에 착안하여 그 특성 차로부터 고저항

고장현상을 판별하도록 시도하므로써 단순히 고장전류 신호의 증가[1] 및 특정 조파 성분의 변화[2]에 근거한 고장검출시 우려되는 문제점을 개선하였다. 1주기의 전류 파형을 전압의 파고치 부근과 다른 부분으로 4등분하여 각 구간별 고조파 전류의 분포 특성 변화를 추출하였다. 고조파 분포 특성 변분을 고장 검출 변수로 신경 회로망에 입력시키고 역전파(back-propagation) 학습법을 써서 고장을 판별하였다. 한국전력공사에서 실측한 고저항 지락 고장 데이터를 적용하여 고장검출 성능 및 정확도를 높이고 활용할 수 있는 가능성을 연구하였다.

2. 아크 지락전류의 특성

기존의 주파수 분포 특성을 이용한 고저항 지락사고 검출 기법은 1주기 전체에 대한 주파수 분포 특성을 고려하므로써 캐패시터 스위칭이나 비선형성이 강한 부하의 고조파 분포특성과 구별이 어려운 문제점이 있다. 고저항 지락 사고시 아크성 전류는 매 주기마다 전압이 높을 때 발생하기 시작하여 서서히 소멸하는 그림 1과 같은 특성을 보이는 반면에, 캐패시터 스위칭 전류는 짧은 기간동안 지속되는 현상을 보이며 회로 정수와 전압 파형 변화에 응동하는 구별된 특성을 가지고 있다.

아크 발생과 재 점호 현상이 반복하게됨에 따라 전류 크기의 진동이 생기고 한 번 아크가 발생하면 주변 공기 절연의 약화로 지속되기 쉽다. 따라서 지속 아크(iarc)는 그림 1에 보인 것처럼 전압 크기가 높은 파고치 부근(er)에서 ta인 순간에 시작되고, 전압이 낮아져 극성이 바뀔 때(tc) 소호되는 성질을 가지게 된다. 아크전류(iarc)는 전압의 크기(e)

* 正 會 員 : 光云大 工大 制御計測工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 光云大 大學院 制御計測工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 光云大 大學院 制御計測工學科 博士課程

接受日字 : 1998年 7月 30日

最終完了 : 1998年 11月 23日

4. 역전파 신경 회로망 학습 알고리즘

신경 회로망은 학습 시키고자하는 입력 성분들과 그에 해당하는 출력소자들, 그리고 이를 연결시켜주는 회로망으로 그림 5와 같이 입력층(input layer)에 직류부터 7조파 성분까지 8개의 입력노드와 출력층(output layer)에 학습결과를 나타내는 1개의 노드를 두며 그 사이에 은닉층(hidden layer) 2층을 두었다. 각 은닉층은 20개의 노드를 가진 구조로 구성하였다. 신경 회로망의 각 노드를 입력-출력 관계로서 연결시킨 상태에서 기준 출력과 실제 출력간의 차이 즉, 오차(ϵ)를 최소화하도록 각 연결 요소의 가중치를 역전파 학습 방법을 써서 조절하는 것이다.

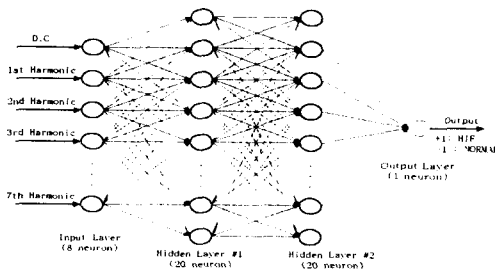


그림 5 역전파 신경회로망의 구조
Fig. 5 Structure of backpropagation neural network

오차와 관련한 평가함수를

$$E = \frac{1}{2} \epsilon^2 \quad (1)$$

로 정하고, 입력층에 인가한 데이터에 대해 식(1)의 평가함수가 최소가 되는 조건을 신경회로망 노드 i, j 간의 가중치 $W_{i,j}$ 가 식(2)의 관계가 되도록 구하였다.

$$\frac{\partial E}{\partial W_{i,j}} = 0 \quad (2)$$

최급강하법을 써서 가중치 변분을 식(3)과 같이 계산했으며,

$$\Delta W_{i,j} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{i,j}} x_i \quad \eta > 0 \quad (3)$$

여기서

η : 학습율
 x_i : i 노드의 출력

학습율 η 는

$$\eta(k+1) = \begin{cases} 1.04\eta(k) & \nabla E(k) > 1.04\nabla E(k-1) \\ 0.7\eta(k) & \nabla E(k) < \nabla E(k-1) \\ \eta(k) & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

을 적용했다.

지역 최저치(local minimum)에 수렴되는 우려를 벗어나

기 위해 식(5)와 같이 모멘텀을 썼다.

$$\Delta W(k+1) = \alpha \Delta W(k+1) + (1-\alpha) \Delta W(k) \quad (5)$$

$$1 \geq \alpha \geq 0$$

본 논문에서는 모멘텀 계수 α 를 다양한 값으로 학습시켜 본 결과 0.9가 적합하였다.

각 노드의 활성화함수는 \tanh 함수를 적용했다

$$\tanh(r; u_j) \quad (6)$$

여기서

$$u_j = \sum_i W_{i,j} x_i + \theta_j, \quad r_j > 0 \quad (7)$$

이다.

고저항 지락 사고의 모의 실험은 폭넓은 고장 특성을 가지도록 다양한 대상 즉, 보도블록 지락, 자갈 지락, 모래 지락 등에서 실측된 데이터를 신경 회로망의 학습에 적용하였다. 고장전류 파형 들을 전압 파형이 높은 구간의 고조파 특성과 낮은 구간의 고조파 성분의 크기를 7조파까지 추출해서 신경 회로망의 입력으로 인가하여 출력이 1이 되도록 학습시키고, 또한 건전한 상태에서의 데이터에 대하여도 같은 조건의 고조파 성분 크기를 입력시켜 출력이 -1이 되도록 학습 시켰다.

5. 적용 사례

한국전력 공사에서 시행한 (자갈, 모래) 인공지락 사고 시험에서 실측한 데이터로부터 사고전과 사고후의 전압 및 전류 파형을 그림 6에 나타냈다. 전압, 전류 파형은 PT와 CT 2차측에서 260 μ sec 간격으로 12bit A/D 변환기를 써서 측정된 것이며, 2차측의 크기로 표시했다.

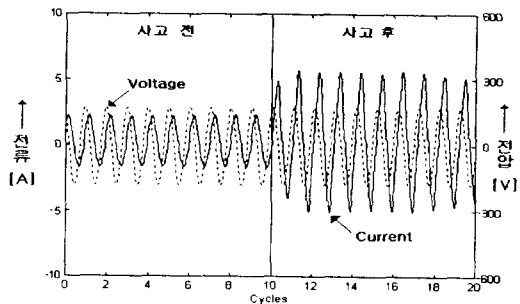


그림 6 전압 및 전류 파형
Fig. 6 Voltage & Current waveform

전류 파형을 전압의 파고치 부분과 저전압 부분에서 FFT를 수행하여 고조파 성분의 크기를 그림 7에 비교해 보았다.

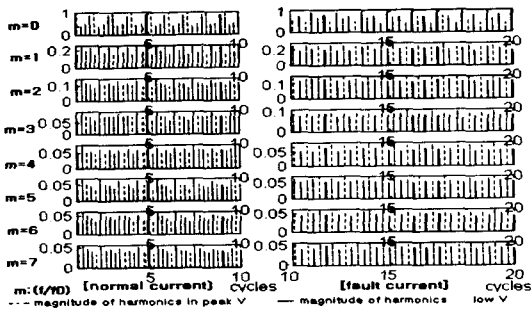


그림 7 전류 파형의 전압위상별 고조파 성분의 크기
Fig. 7 Magnitude of harmonics of current waveform as voltage-phase

그림에서 점선은 전압이 파고치 부근일 때 전류의 고조파 성분 크기를 나타낸 것이고, 실선은 낮은 부분의 전압에서 고조파 성분의 크기를 나타낸 것이다. 각 고조파 성분의 크기는 직류분(m=0) 최대치를 기준으로 정규화 하였다. 고저항 지락 사고시는 전압이 파고치일 때 고조파 전류가 더 크게 나타나고, 정상 전류에 대해서는 저전압 구간에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 고저항 지락사고는 전류크기 변화가 작지만 고조파 성분의 분포가 달라지는 특성을 보이고 있으며 전압 파형의 부분별로도 다른 양상을 나타내고 있다.

본 논문에서는 전압이 파고치 부근일 때와 낮은 부분일 때의 고조파 전류 크기의 차를 고장 검출 변수로써 신경회로망에 입력시켜 고장을 판별토록 시도하였으며, 검출 과정은 그림 8과 같다.

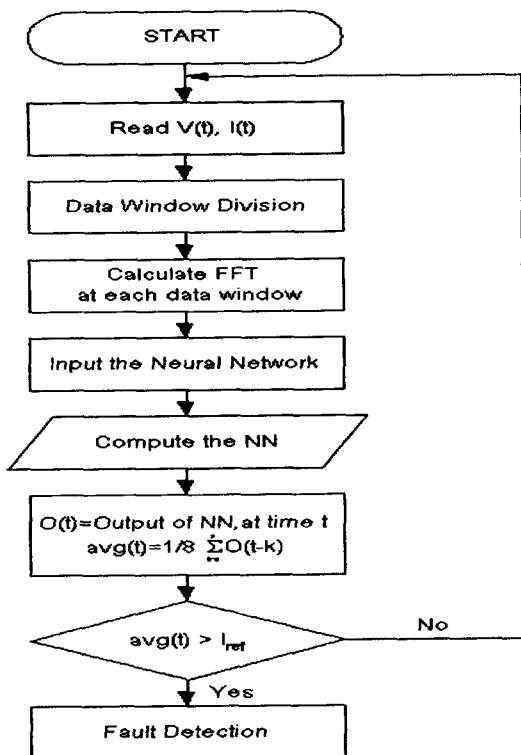
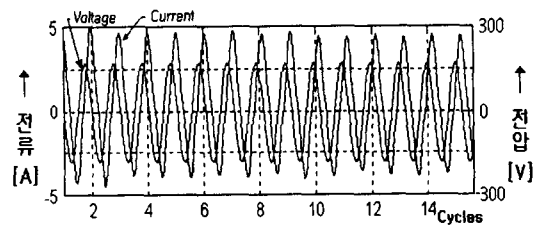
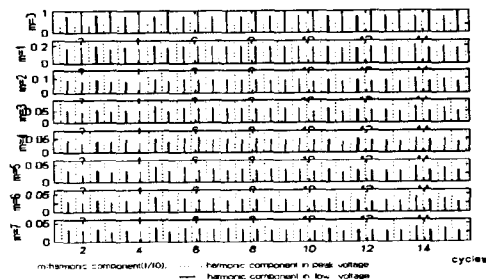


그림 8 고임피던스 고장 검출 과정
Fig. 8 Flow diagram of the HIF detection

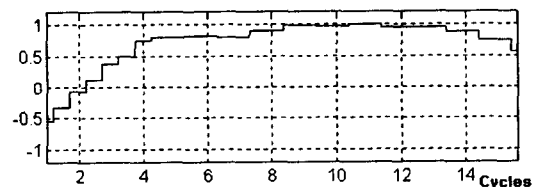
신경 회로망을 지락사고별로 학습시켰을 때 보도블록, 자갈모래, 모래 지락 사고에 대해서는 빠른 수렴특성을 보였으나 아스팔트 지락 사고는 그 고장전류가 매우 작아서 더딘 수렴특성으로 나타났다. 각종 고저항 지락사고 전류의 데이터와 아크부하 전류 데이터를 순차적으로 적용하여 신경회로망을 학습 시켰을 때 각 고장별로도 정확히 검출하는 성능을 보였다. 다음 그림 9~12는 각 고저항 사고 전류 파형과 고조파 성분 및 고장검출 성능을 보인 것이다. 전압 및 전류 파형(그림 9~12의(a))은 PT와 CT 2차 측에서 260 μsec 간격으로 A/D 변환기를 써서 측정된 것이며, 2차측 크기로 표시했다.



(a) 전압, 전류 파형



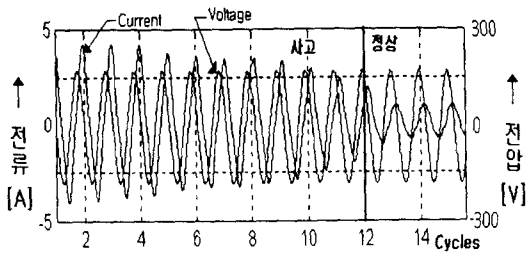
(b) 데이터 윈도우별 FFT



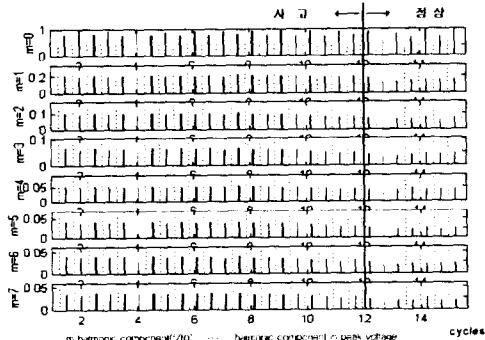
(c) 사고 판단 출력

그림 9 보도블록 지락시 (a) 전압, 전류 파형, (b) FFT, (c) 사고 판단 출력
Fig. 9 Fault on sidewalk (a) Voltage & Current waveform, (b) FFT, (c) Output of a fault detector

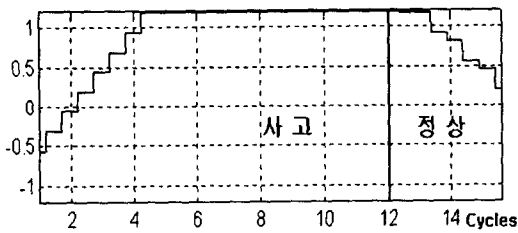
그림 9.(a)는 배전선로가 보도블록에 지락시 사고 파형만을 보인 것으로 사고 전류의 크기가 아크의 발생과 소호에 따라 미소하게 진동하고 있음을 알 수 있으며, 각 윈도우별로 FFT하여 그림 9.(b)에 보였다. 사고 판단 출력은 신경회로망의 출력이 4cycle 동안 연속해서 HIF(+1)일 때 +1이 되도록 현 시점부터 이전 출력 값을 누적시켜 나타냈으며, 이는 실제통에서 발생할 수 있는 순간적인 과도현상에 의한 오동작을 방지하기 위함이다.



(a) 전압, 전류 파형



(b) 데이터 윈도우별 FFT

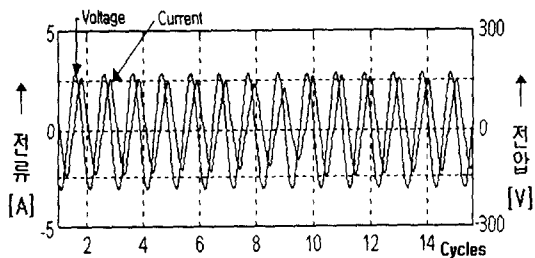


(c) 사고 판단 출력

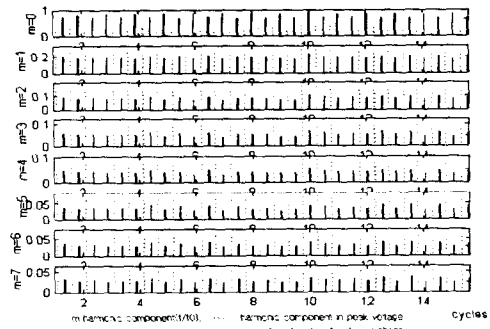
그림 10 자갈모래 지락시 (a) 전압, 전류 파형, (b) FFT, (c) 사고 판단 출력

Fig. 10 Fault on a mixture of gravel & sand (a) Voltage & Current waveform, (b) FFT, (c) Output of a fault detector

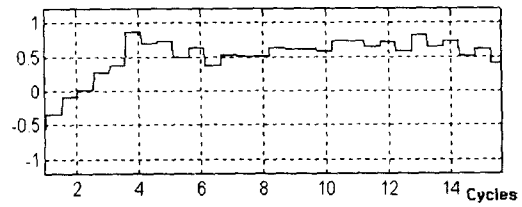
그림 10은 자갈모래 사고 파형이 12cycle 지속되다가 정상상태로 되돌아가는 경우를 대상으로 고장 검출 판별을 시도한 것이다. 4cycle 이후에 +1이 되어 정확히 검출된 상태로 지속되다가 사고가 제거됨에 따라 정상 상태로 환원되고 있음을 보이고 있다.



(a) 전압, 전류 파형



(b) 데이터 윈도우별 FFT

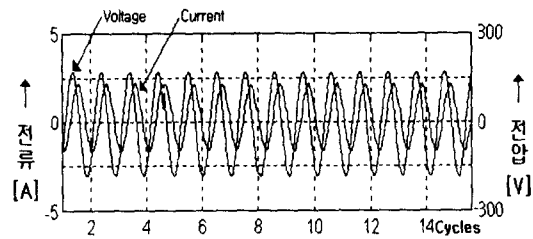


(c) 사고 판단 출력

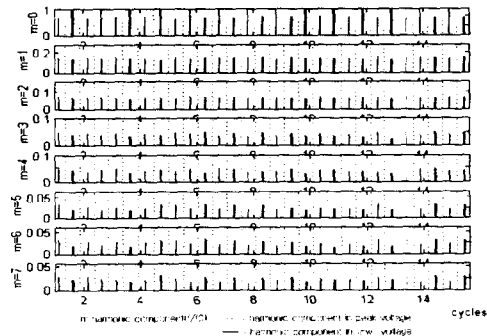
그림 11 모래 지락시 (a) 전압, 전류 파형, (b) FFT, (c) 사고 판단 출력

Fig. 11 Fault on sand (a) Voltage & Current waveform, (b) FFT, (c) Output of a fault detector

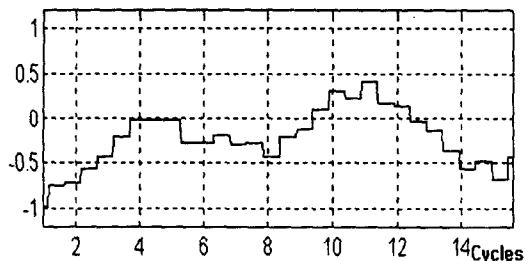
고장 상태가 지속된 모래 고장의 경우(그림 11)에도 고장 임을 판별하여 사고 판단 출력이 +1에 근접한 값으로 수렴하는 성능을 보였다.



(a) 전압, 전류 파형



(b) 데이터 윈도우별 FFT



(c) 사고 판단 출력

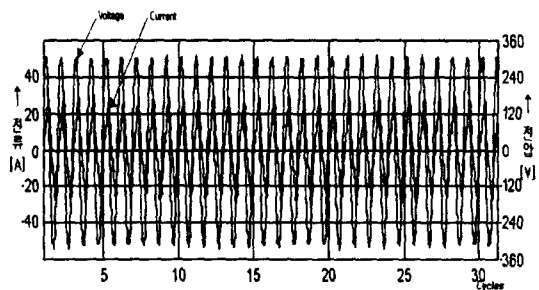
그림 12 아스팔트 지락시 (a) 전압, 전류 파형, (b) FFT, (c) 사고 판단 출력

Fig. 12 Fault on asphalt

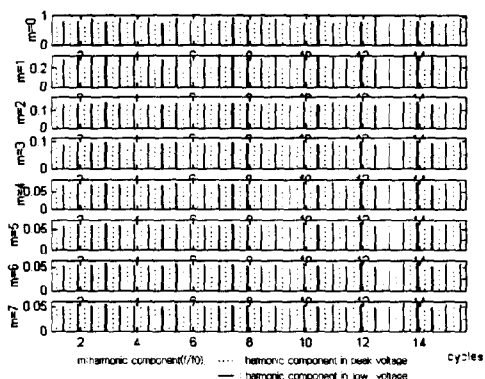
(a) Voltage & Current waveform, (b) FFT, (c) Output of a fault detector

그림 12는 아스팔트 사고 파형이 지속된 경우에 고장 검출 판별을 시도한 것으로 신경 회로망이 고장 일부만을 판별하여 사고 판단 성능이 미약하게 나타났다. 아스팔트 상의 사고도 파형의 부분별로 고장상태를 감지하고 있으며 지속성의 정도 차가 판별에 영향을 주는 것으로 보인다.

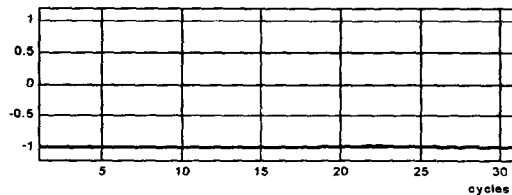
실측한 아크부하 전류를 대상으로 학습된 신경회로망을 적용하여 판별 성능을 살펴보았다. 아크 부하전류가 계속 흐르는 경우는 그림 13에 전압 파형과 함께 보였으며, 고저항 지락고장과는 뚜렷이 구별되는 양상을 나타내고 있다.



(a) 전압, 전류 파형



(b) 데이터 윈도우별 FFT

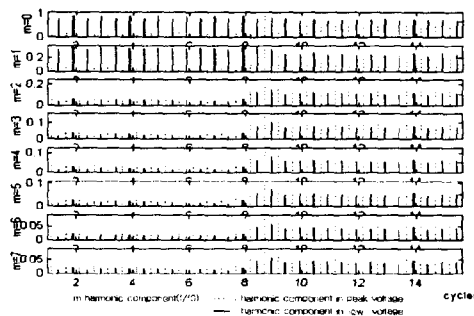


(c) 사고 판단 출력

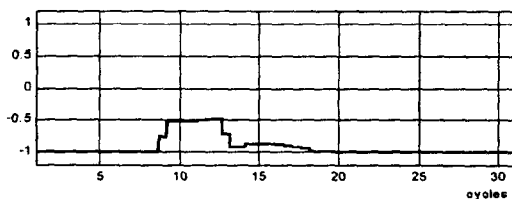
그림 13 지속 아크 부하시 (a) 전압, 전류 파형, (b) FFT, (c) 사고 판단 출력

Fig. 13 Lasting arc load (a) Voltage & Current waveform, (b) FFT, (c) Output of a fault detector

또한 순간적으로 아크 부하전류가 흐르다가 소멸되는 경우의 전류 파형(그림 4)에 적용한 결과를 그림 14에 나타냈다.



(a) 데이터 윈도우별 FFT



(b) 사고 판단 출력

그림 14 순간 아크 부하시

(a) FFT, (b) 사고 판단 출력

Fig. 14 Instantaneous arc load

(a) FFT, (b) Output of a fault detector

아크 부하전류가 흐르기 시작하는 시점은 고저항 지락 사고전류와 유사한 특성을 가지고 있어서 사고로 판별해 가는 특성을 보이다가 반복되는 전류 파형으로부터 사고가 아닌 부하로 판별해 내는 과정을 보이고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 학습 능력을 가진 신경회로망을 고저항 고장 판별에 적용하였다. 고저항 지락현상은 도체의 전압이

과고치에 가까울 때 아크성 고장전류가 흐르게 되는 특성에 착안하여 전압 파형의 부분별로 전류 파형의 고조파 성분을 추출하였다. 여러 형태의 고저항 고장실험에서 실측된 전류 파형을 대상으로 전압이 높은 과고치에서의 고주파전류 분포와 전압이 낮은 구간에서의 고주파 분포의 차이를 입력시킨 신경 회로망의 학습으로 정확도가 높은 고저항 사고검출 성능을 얻었다. 아크 부하전류와 아크 지락고장 전류를 선별할 수 있도록 하기 위해 다양한 조건의 아크 부하를 실측하고, 그 데이터를 학습에 적용하여 정확히 판별 결과를 얻었다. 신경회로망의 학습 방법으로 역전파 알고리즘을 적용하였으며, 다양한 형태의 고저항 고장에 대해 복잡한 수식적 해석이 없이도 검출이 가능함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 광운대학교 연구지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] B. Mike Aucoin and B. Don Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components", IEEE Transactionson Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No.6, pp.1596-1606, Jun. 1982

[2] "High Impedance Fault Detection Using Third Harmonic Current", Electric Power Research Institute Report EL-2430, Prepared by Hughes Aircraft Co., Jun. 1982

[3] B. Mike Aucoin and B. Don Russell, "Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals Near 60Hz", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.2, pp.342-348, Apr. 1987

[4] S. J. Balsler, K. A. Clements and D. J. Lawrence, "A Microprocessor-based Technique for Detection of High Impedance Faults", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, pp.252-258, Jul. 1986.

[5] Huand, C. L., Chu, H. Y., Chen, M. T. "Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test", IEEE. Trans. on Power Delivery, Vol.3, No.4, Oct. 1988.

[6] Russel, B. D., Chinchali, R. P. "A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No.1, Jan, 1989.

[7] Kwon, W. H., Lee, G. W., Park, Y. M. " A Study for the improvement of the protection relay scheme on multi grounded distribution system", KEPCO Project Final Report, KRC-85A-JO5, 1987.

[8] A. F. Sultan, G. W. Swift, & D. J. Fedirchuk, "Detection of High Impedance Arcing Faults Using a

Multi-Layer Perceptron", IEEE. Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.4, Oct.1992, pp. 1871-1877

[9] S. Ebron, D. L. Lubkeman, & M. White, "A Neural Network Approach to the Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders", IEEE. Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.2, April, 1990, pp.905-914

[10] D. Baigent, & E. Lebenhaft, "Microprocessor- Based Protection Relays: Design and Application Examples", IEEE. Trans. on Industry Application, Vol.29, No.1, Jan/Feb. 1993, pp. 66-71.

[11] 임화영, 박찬국, 류창완, 고재호. "배전자동화를 위한 적용보호시스템 연구", 기초 전력 공학 공동 연구소 중간 보고서, 96-중-01, 1997. 8.

[12] Ko, J. H., Ryu, C. W., Yim, W Y, "Detection of High Impedance Faults using Neural Nets and Chaotic Degree", Proc. of EMPD '98, IEEE, Singapore, Vol.2 , March. 1998, pp. 399-404.

저 자 소 개



임 화 영(任 化 永)

1946년 3월 18일 생. 1973년 한양대 공대 전기과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~1988년 광운대 공대 전기공학과 교수. 현재 광운대 공대 제어계측공학과 교수



유 창 완(柳 昌 完)

1969년 5월 12일 생. 1992년 광운대 공대 제어계측공학과 졸업. 1994년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 광운대 대학원 제어계측공학과 박사과정 수료



고 재 호(高 載 虎)

1972년 8월 13일 생. 1995년 광운대 공대 제어계측공학과 졸업. 1997년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 광운대 대학원 제어계측공학과 박사과정