

신경 회로망-퍼지로직을 이용한 배전선로 사고 검출 기법의 개발

최정환*, 장성일*, 엄재필*, 박준식*, 김광호*, 김남호*, 강용철**
 *강원대학교 전기공학과 **전북대학교 전기공학부

Development of Fault Detection Algorithm on distribution lines using neural network & fuzzy logic

J.H.Choi*, S.I.Jang*, J.P.Eom*, J.S.Park*, K.H.Kim*, N.H.Kim*, Y.S.Kang**
 *Kangwon National Univ., **Chonbuk National Univ.

Abstract - This paper proposes fault detection method using a neural network & fuzzy logic on distribution lines. Fault on distribution lines is simulated using EMTP. The pattern of high impedance fault on pebbles, ground and short-circuit fault were take as the learning model. In this paper proposed fault detection method is evaluated on various conditions. The average values after analyzing fault current by FFT of even·odd harmonics and fundamental rms were used for the neural network input. Test results were verified the validity of the proposed method

2. 모델 계통

단락 용량이 100(MVA)인 22.9(kV) 배전 계통이며, 배전선은 ACSR 160mm² 과 1800mm² 길이의 완급에 설치되었으며, 1회선용의 데이터를 사용하였다[1]. 이를 EMTP로 모의하였으며, 샘플링 주파수는 한 주기당 16샘플로 하였다.

모델 계통은 그림 1과 같은 배전 계통을 선택하였으며, 계통에서의 사고 모의는 고저항 사고, 지락 사고, 단락 사고이며, 특히 고저항 사고는 다양한 토양을 고려하기 위해 강자갈, 습기찬 보도블록, 자크를 설치한 차량에서의 사고를 모의하였다. 부하의 종류로는 RL 부하, RL 및 컨버터 부하, 아크로 부하를 이용하였다. 모의에 사용된 각 부하별 사고 거리로는 RL 부하인 경우 1, 5, 10(km), RL 및 컨버터 부하인 경우 0.2, 1.2, 1.8(km), 아크로 부하인 경우 0.2, 1, 1.8(km)에서의 배전선 사고를 모의하였다.

배전선에서 사고와 유사한 특성을 가진 조건으로 부하 증가와 역률 보상을 들 수 있는데 이에 대한 영향을 고려하기 위해 부하 증가인 경우에는 각 부하별로 각각 6(MVA)에서 8(MVA)로 증가하도록 모의하였고, 역률 보상의 경우에는 R-L 부하에 대해 역률 90(%)에서 99(%)로 보상되도록 모의하였다[3].

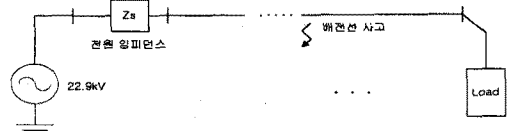


그림 1. 배전 계통도

3. 사고 분석

2장과 같은 모델 계통을 대상으로 고저항 사고, 지락 사고와 단락사고를 모의하였다. 특히 고저항 사고는 토양의 종류가 강자갈인 경우를 사용하였다. 배전 선로에서 사고가 발생할 때 일반적으로 기본파 실효치가 2배 이상 증가하기 때문에 이를 사고 검출의 지수로 사용이 가능하나 유도전동기, 아크로 부하의 기동시 보통 정상적인 상황이라 하더라도 평상시의 2배 정도의 부하 전류가 발생하기 때문에 단지 기본파 실효치만으로 사고를 검출하는데는 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 전류의 기본파 크기외에 고조파 양의 변화분에 대해서 검토하였다. 사고에 따른 고조파별 변화 추이를 관찰하기 위하여 고저항 사고 모의하여 얻어지는 사고 전류 데이터에 대해 FFT를 수행하였다. 분석을 위해 매 샘플(1주기 16샘플)마다 이전 1주기에 대한 FFT를 수행해 각 고조파 성분을 추출하고, 이때 부하 전류의 크기에 무관한 고조파 성분의 양을 얻기 위해 기본파의 크기에 대한 각 고조파의 비로 정의한 고조파 지수를 사용하여 정상시와 사고시 고조파 양의 변화를 살펴보았다. 또한 RL 및 컨버터 부하, 아크로 부하의 경우 고조파의

1. 서 론

배전 계통은 건물, 도로 등과 같이 일반 수용가와 밀접하게 구성되어 있기 때문에 배전선로 상에서 사고가 발생했을 경우 송전선로 사고와는 달리 사고로 인하여 낙하한 선로가 일반 건물과 사람 등에 쉽게 노출되어 인명 피해, 화재, 설비 손상 등을 초래할 수 있다.

배전선에서 발생하는 사고에서 많은 비중을 차지하고 있는 고저항 사고(High Impedance Fault : HIF)는 전선이 고저항 물질에 접촉하여 발생하는 사고로 사고시 사고 전류의 크기가 작으며 토양의 종류, 사고의 유형, 부하의 상태 및 부하의 종류에 따라 다양한 특성을 보이기 때문에 고저항 사고를 검출의 어려움이 있다. 최근에 전력연구원에서 연구 발표한 고저항 사고 검출 방법으로는 지식 기반의 방법을 이용한 Fuzzy Logic[6]과 고저항 사고의 불규칙한 특성을 고려하여 프랙탈 및 카오스 이론[7]을 이용한 연구가 발표되고 있다. 배전선에서 발생하는 사고 중 지락 사고, 단락사고는 기본적으로 사고 전류가 커 과전류 계전기로 검출이 용이하다. 또한, 배전 계통 부하조건이 변화하는 경우인 부하증가와 역률을 개선하기 위하여 전력용 콘덴서를 투입할 경우에는 계전기가 사고로 오판할 수 있는데 이런 경우에 사고로 인식하지 않도록 해야 한다.

따라서, 본 논문에서는 배전 계통에서 정상 상태, 사고 상태의 특성을 고려하여 사고를 검출할 수 있도록 신경 회로망[2]과 퍼지[6]를 이용하여 배전 계통상의 사고를 검출할 수 있는 기법을 제안한다. 배전선로 고저항 사고 검출을 위해 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 강자갈에서 발생한 고저항 사고, 지락 사고, 단락 사고를 모의하였고, 사고와 유사한 특성을 나타내는 부하 증가, 역률 보상의 계통 조건을 모의하였고, 다양한 부하 조건을 고려하기 위하여 R-L부하, R-L 및 컨버터 부하, 아크로 부하로 구성된 배전 계통을 모의하였고, 사고 모의를 통하여 얻어진 사고 전류를 주파수 분석하였으며, 기본파의 크기와 기본파에 대한 짝·홀수 고조파의 양, 정상전류의 크기로 정의한 지수들의 변화를 분석하여 배전선로 상의 사고 검출 기법을 개발하였다. 특히 고저항 사고에 있어서는 토양의 종류를 달리하여 본 논문에서 제시한 사고 검출 기법 성능을 테스트하였다.

양이 매우 불규칙하게 변화하기 때문에 매 샘플마다 이전 1주기의 고조파 비를 한 주기 평균하여 고조파의 변화를 분석하였으며, 신경회로망의 입력으로 사용되는 지수들은 아래와 같이 정의하였다. 먼저, 고조파 비는

$$H_i^j = \frac{t\text{시점의 } j\text{고조파 크기}}{t\text{시점의 기본파 크기}} = \frac{I_i^j}{I_i^1} \quad (1)$$

이며, 여기서 I_i^1, I_i^j 은 t 시점에서 1주기 FFT를 수행하여 얻어진 기본파 크기와 j 고조파의 크기, j 는 2, 3, 4, 5 이다.

식 1을 다시 한 주기 평균하여 식 2와 같이 정의하였고, 본 논문에서 제시한 사고 검출 기법의 입력으로 사용하기 위하여 식 3, 4와 같이 짝수 고조파 지수, 홀수 고조파 지수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{고조파 지수 } HI_i^j = \frac{1}{16} \sum_{t=0}^{15} H_i^j \quad (2)$$

$$HI_i^{2+4} = \sqrt{(HI_i^2)^2 + (HI_i^4)^2} \quad (3)$$

$$HI_i^{3+5} = \sqrt{(HI_i^3)^2 + (HI_i^5)^2} \quad (4)$$

또한, 고저항 사고에 대한 검출 용의를 위하여 기본파 성분만을 한 주기 평균하여 식 5와 같이 기본파 실효치 지수를 정의하였다.

$$FI_i = \frac{1}{16} \sum_{t=0}^{15} I_{t-i}^1 \quad (5)$$

여기서, 기본파 실효치 지수 FI_i 은 0과 1사이의 값으로 하기 위하여 22.9[kV], 최대부하용량 10[MVA]인 최대부하전류의 1.4배인 352[A]로 정규화하였으며 FI_i 가 1이상일 경우에는 1로 설정하였다.

배전 계통의 사고시 계통의 불평형으로 인하여 영상 전류가 발생을 하게 된다. 따라서, 영상 전류는 배전선에 있어서 사고를 검출하는데 활용할 수 있는 중요한 지수가 된다. 본 논문에서 사용하는 영상 전류 실효치 지수는 다음과 같이 정의한다.

$$OI_i^0 = \frac{1}{16} \sum_{t=0}^{15} I_{t-i}^0 \quad (7)$$

이며, 여기서 영상 전류 실효치 지수 OI_i^0 를 0과 1사이로 하기 위해 영상 전류를 50[A]로 정규화하여 OI_i^0 가 1이상일 경우에는 1로 설정하였다.

지수들을 통해 얻어진 분석 결과를 요약하면 정상 상태는 사고 상태와는 달리 기본파 실효치 지수에 대해서는 23~42%의 값을 취하며 고저항 사고에 대해서는 38~74 %사이의 값을 나타내며, 짝·홀수 고조파 지수는 정상상태일 때 컨버터 부하나 아크로 부하는 많은 양의 고조파 성분이 발생하고 있으며, 사고 발생시에는 더 많은 고조파 성분이 발생하면서 심한 변화가 나타남을 보여 주고 있다. 영상 전류에 있어서는 부하의 종류에 따라 R-L 부하에 대해 사고 발생시에는 30[A]이상 발생하고 있다. 지락 사고 시에는 기본파 실효치 지수가 크며, 영상전류 실효치 또한 상당히 크게 발생하고 있음을 보여 주고 있지만, 짝수·홀수 고조파 지수에 있어서는 거의 발생하지 않고 있다. 단락 사고 시에는 기본파 실효치 지수는 상당히 크지만, 영상전류는 지락사고에 대해 거의 발생하지 않고 있으면, 짝수·홀수 고조파 지수에 대해서는 지락사고시와 마찬가지로 거의 발생하지 않고 있다(9).

4. 신경회로망

신경 회로망에서 쓰이는 신경 회로망은 오류 역전파 신경 회로망이며, 신경 회로망의 구성은 3개의 입력층과 은닉층, 출력층으로 구성하였다. 신경 회로망의 입력으로는 기본파 실효치 지수, 짝수 고조파 지수, 홀수 고조

파 지수로 3개의 입력을 사용하였으며, 은닉층의 뉴런의 수는 각각 20개로 설정하였으며, 출력의 뉴런 수는 2개로 고저항 사고 상태, 지락 및 단락 사고 상태로 구분할 수 있도록 이진 출력을 사용하였다. 은닉층과 출력층은 단극성 시그모이드 함수를 활성화 함수로서 사용하였다. 학습률과 모멘텀은 각각 0.3, 0.5를 사용하였다.

5. 퍼지 추론

신경회로망에서 사고 유형을 분류하고, 이에 따른 출력을 사고 검출이 오동작하지 않도록 퍼지 추론부의 입력으로 사용하였다. 퍼지 추론부의 입력으로는 신경회로망의 두 개의 출력과 기본파 실효치 지수, 영상전류 실효치 지수를 사용하였다.

5.1 퍼지 멤버십 함수의 정의

퍼지 시스템에서 사용하는 입력 변수를 퍼지화하기 위하여 신경회로망의 출력들은 singleton 함수를 이용하였으며, 기본파 실효치 지수와 영상전류 실효치 지수는 그림 2의 (a)와 같이 퍼지 멤버십 함수를 사용하였다. 또한 최종사고 판단을 위해 사용되는 멤버십 함수는 그림 2의 (b)와 같이 정의하였다.

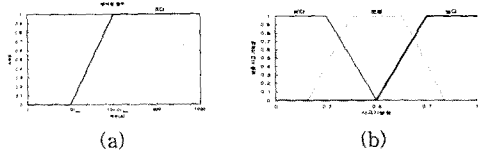


그림 2 사고 판단을 위한 퍼지 멤버십 함수

5.2 최종 사고 판단 퍼지 룰의 구성

계통의 사고시 계전점에서 얻은 전류를 FFT 분석을 하여 퍼지 입력 지수를 획득한 후 퍼지 입력 지수의 변화 추이를 분석한 결과와 기본파 실효치 지수, 영상전류 실효치 지수의 분석을 통해 얻은 결과를 이용하여 아래 표 1과 같은 최종 사고 검출 룰을 구성하였다. 각 룰은 사고로 판정되는 규칙을 퍼지화하여 표현하였다.

표 1 최종사고 검출 퍼지 룰

	FI_i	신경회로망 출력 1	신경회로망 출력 2	OI_i^0	비 고
Rule 1	높다	높다	낮다		고저항
Rule 2	보통	높다	낮다		고저항
Rule 3	높다	낮다	높다	높다	지락, 단락
Rule 4	높다	낮다	높다	낮다	지락, 단락

5.3 최종 사고 판단 알고리즘

아래 그림 3은 최종사고 판정 흐름을 나타내며, 각 신경회로망의 출력 2개에 의한 분석, 기본파 실효치 지수 분석, 영상전류 실효치 지수 분석에서 예비 판정한 사고 가능성 값을 종합적으로 추론하고 최종적인 사고 판정을 수행한다. 최종적인 사고 판정은 최소 반주기 이상 종합적인 사고 가능성이 0.6이상 될 때 사고로 판단하도록 되어 있다.

6. 사례 연구

본 논문에서 제시한 사고 검출 기법의 성능을 평가하기 위해 학습하기 위해 사용된 데이터는 위의 배전 계통을 사용하여 토양의 종류가 강자갈에서의 고저항 사고, 지락 사고, 단락 사고를 모의하였으며, 부하의 종류별로 R-L 부하에서는 1[km]와 10[km], R-L 및 컨버터 부하에서는 0.2[km]와 1.8[km], 아크로 부하에서는 0.2[km]와 1.8[km]에서의 EMTP를 이용하여 얻어진 모의 사고 전류를 분석하여 학습 패턴으로 사용하였고, 또한 출력 오차가 0.01이 될 때까지 학습을 시켰다. 학

습된 상태를 테스트하기 위하여 각각의 부하별로 5, 1.2, 1[km]에서 얻은 사고 전류와 부하의 변동의 경우, 즉 부하 증가, 전력용 콘덴서를 투입하여 역률 보상을 하였을 경우를 이용하였고, 특히 고저항 사고에 대해서는 다양한 토양의 종류에 따른 검출특성을 알아보기 위해 강자갈이 아닌 습기찬 보도블록과 자크를 설치한 차량의 경우를 이용하여 본 논문에서 제시한 사고 검출기법의 성능을 평가하였다.

그림 4은 토양의 종류가 습기찬 보도 블록일 경우의 고저항 사고에 대한 검출 결과이며, 그림 5는 지락 사고에 대한 검출 결과, 그림 6는 단락 사고에 대한 검출 결과, 그림 7은 부하 증가에 대한 검출 결과, 그림 8은 역률 보상에 대한 검출 결과이다. 또한 R-L 부하, R-L 및 컨버터 부하, 아크로 부하에서의 출력 결과를 나타내었다. 출력 결과를 살펴보면, 사고가 일어나지 않거나 역률 보상시나 부하 증가시에는 사고로 판단하지 않고, 사고가 발생했을 때 2 주기이내에 사고를 검출하였다.

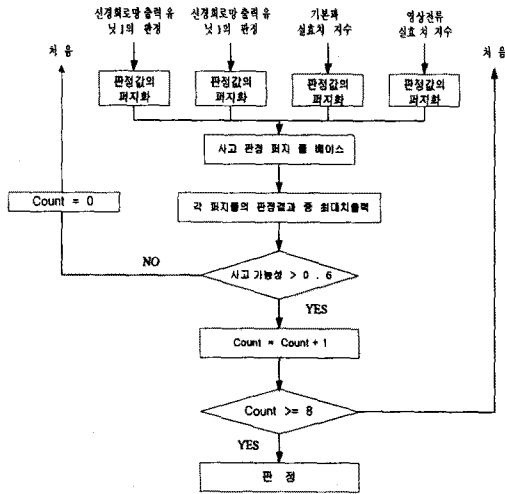
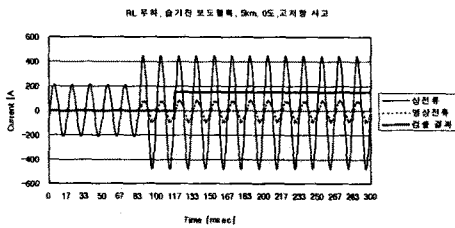
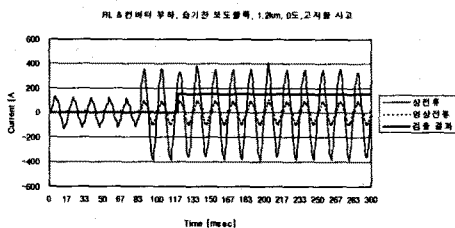


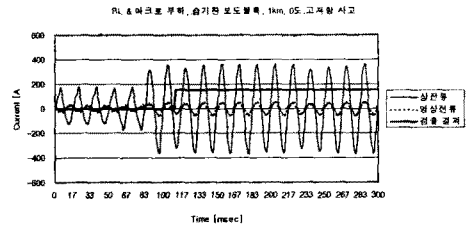
그림 3 최종 사고 판단부의 흐름도



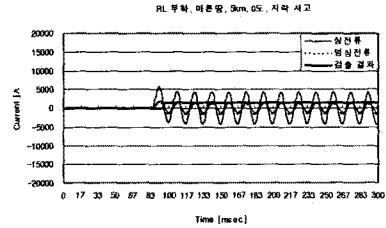
(a) R-L 부하 5km 사고



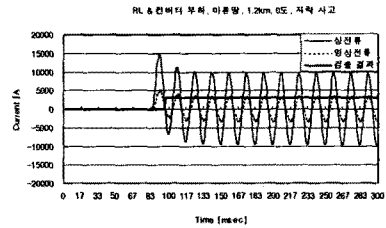
(b) R-L 및 컨버터 부하 1.2km 사고



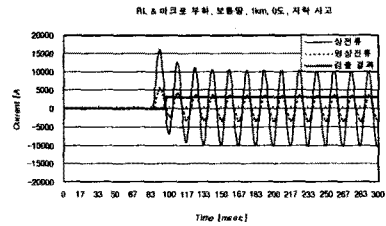
(c) 아크로 부하 1km 사고
그림 4 습기 찬 보도블록에서의 고저항 사고



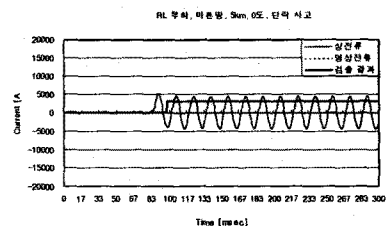
(a) R-L 부하 5km 사고



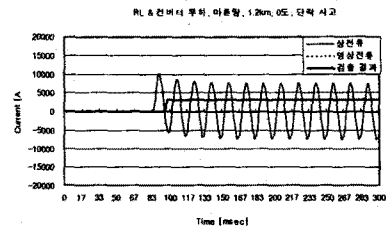
(b) R-L 및 컨버터 부하 1.2km 사고



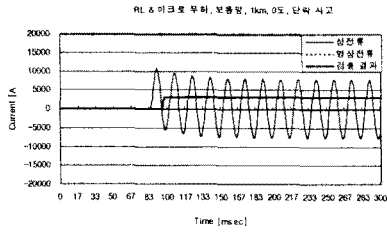
(c) 아크로 부하 1km 사고
그림 5 지락 사고



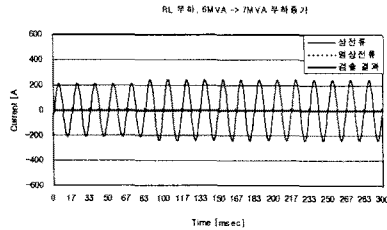
(a) R-L 부하 5km 사고



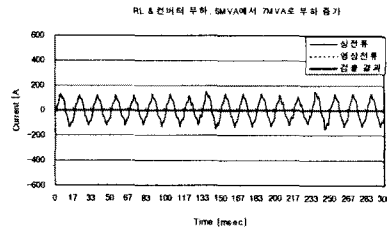
(b) R-L 및 컨버터 부하 1.2km 사고



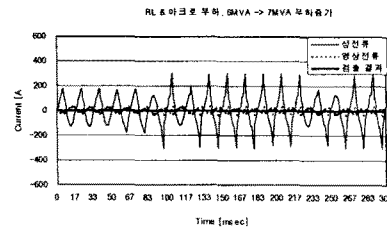
(c) 아크로 부하 1km 사고
그림 6 단락 사고



(a) R-L 부하 증가



(a) R-L 컨버터 부하 증가



(c) 아크로 부하 증가
그림 7. 6 MVA에서 8 MVA로 부하 증가

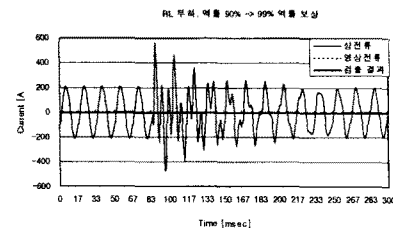


그림 8. R-L 부하, 90%에서 99%로 역률 보상

7. 결 론

본 논문은 22.9(kV)의 배전 계통의 계통 조건을 변화시키면서 EMTP를 이용하여 모의한 배전 선로에서의 고저항 사고에 대한 사고 전류 특성을 고조파 분석하였고, 기본파 실효치 지수, 짝·홀 고조파 지수를 이용하여 배전선로 상의 사고 검출 기법을 제안하였다.

본 논문에서 제시한 사고 검출 기법은 배전 선로상의 사고 중 고저항 사고에 대해 강자갈에서의 고저항 사고를 이용하였고, 테스트는 습기가 있는 보도블록과 차량에서 발생한 고저항 사고 데이터를 이용하였으며, 두 가지 테스트용 고저항 사고를 본 논문에서 제시한 사고 검출 기법은 모두 사고로 검출하였으며, 지락사고, 단락 사고 역시 사고로 검출하여 본 논문에서 제시한 사고 검출 기법의 우수한 특성을 보이므로 실제에 가까운 사고 검출 기법이라 할 수 있다.

향후에는 좀더 다양한 토양에서의 고저항 사고에 대한 검출과 사고와 유사한 특성을 갖는 부하증가와 역률 보상에 관한 연구, 단계적으로 증가하는 고저항 사고에 관한 검출, 유도 전동기의 투입 등과 같은 좀더 다양한 부하 조건하에서 사고 검출기법에 대한 연구를 진행할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 강용철외, "EMTP를 이용한 배전 계통의 고저항 사고 모델링", 대한전기학회 춘계학술대회, pp72-75, 1997
- [2] David M. Skapura, "Building Neural Networks", pp29-42
- [3] 최성규외, "배전 선로 보호를 위한 고저항 사고 검출 톨의 개발", 강원대학교 석사학위 논문, 1997
- [4] David C. Yu, Shoukat H. Khan, "An Adaptive High and Low Impedance Fault Detection Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 4, October, 1994
- [5] A.F.Sultan, G.W.Swift, D.J.Fedirchuk, "Detecting Arcing Downed-Wires Using Fault Current Flicker and Half-Cycle Asymetry", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994
- [6] 한전 전력 연구원, "지능형 보호계전기 연구 개발", 최종보고서, 1997
- [7] 유창완외, "전력 계통에서의 고저항 고장 검출 기법 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, 1997
- [8] B.D. Russell, Ram P. Chinchali, "A Digital Signal Processing Algorithm for Detection Arcing Faults on Power Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 4, No. 1, January, 1989, pp. 132-140
- [9] 최정환외, "신경회로망을 이용한 배전선 사고 검출 기법의 개발" 대한전기학회 하계학술대회, pp1114-1117, 1998