

## Fuzzy 추론을 이용한 3상 전력용 변압기 보호계전 알고리즘

\*김상태, 진보건, 정상기, 이승재, 강상희  
명지대학교 전기공학과

윤상현, 이상윤  
Procom System

### 3 phase Power Transformer Protective Relaying Algorithm based on Fuzzy Inference

\*S.T Kim, B.G JIn, S.K Chung, S.J Lee S.H Kang  
Myongji University

S.H Yoon S.Y Lee  
Procom System

**Abstract** - The various criteria to identify the disturbances of the power transformer has been reported in this paper. They have been derived through EMTP simulations of internal faults, inrush and overexcitation for the model of 154/22.9[kV], 40[MVA], Y-Y three-phase power transformer. We also propose the algorithm which makes bpa Functions and infers the final decision from them based on Modified Dempster-Shafer's rule of combination.

#### 1. 서론

전력용 변압기는 전력계통 기기중 가장 중요한 요소이며, 사고가 발생할 경우 그 파급 효과는 상당히 커 변압기 보호는 필수적이라 할 수 있다. 이 변압기 보호용 계전기로는 차동 계전기가 주류를 이루고 있다. 그러나 이는 내부사고가 아닌 외란(여자돌입, 과여자)을 정확히 구분해 내지 못하고 오동작하는 경우가 많이 발생하여, 근래에 들어와서 고조파, 변압기의 전압, 전류, 자속의 결합방정식, 신경 회로망이나 퍼지 의사결정, 전력을 이용하는 방법등이 많이 제시되고 있다.[1,2]

보호 계전기의 동작 신뢰도를 높이기 위한 종래의 연구는 단일 기준에 의한 판단방법의 개선에 치중되어 왔으나 이는 계통의 복잡성과 사고 현상의 다양성에 비추어 볼 때 근본적인 한계가 있어 개선이 요구 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 판단 방법을 종합적으로 고려할 수 있는 퍼지 추론(Fuzzy Inference)을 이용하였다. 다양한 변압기 과도현상을 모의하였고, 이 데이터를 이용하여 3상 전력용 변압기의 내부 사고와 다른 외란과의 기준 8가지를 세우고 퍼지 추론 방법으로 MDS(Modified Dempster-Shafer's rule of Combination)을 이용한 판단방법을 제시하였다.

#### 2. 변압기 과도 현상 모델링

본 논문에서는 154/22.9[kV], 40[MVA], Y-Y결선의 단상 Bank 3대로 운전하는 3상 변압기 모델을 대상으로 EMTP (Electromagnetic Transient Program)를 이용하여 변압기 과도현상을 모의하였으며 내부사고 모의를 위해서 BCTRAN을 이용하였고, 여자돌입 및 과여자의 포화모델을 모의하기 위하여 HYSDAT를 사용하였다.[3,4,5]

#### 3. 기본 외란 판단 기준 분석

그림 1과 같은 모의계통을 EMTP를 이용하여 360여 가지(내부사고 34%, 여자돌입 33%, 과여자 33%)를 모의 하였고, 기본 모델과 변화 변수로는 변압기 포화점과 변압기 2차측 선로의 정전용량을 고려하였다.

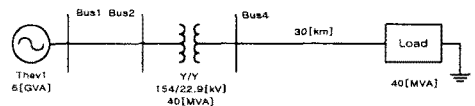


그림 1. 모델 계통도

모의 시간은 사고 전 2주기, 사고 후 8주기이며, 주기당 16회의 샘플링을 하였고, 고조파 분석은 DFT(이산 푸리에 변환)을 이용하였다.

##### 3.1 기본 외란 판단 기준 추출 대상

본 논문에서는 변압기 사고 중 차동전류 기본과 성분이 가장 작은 사고(충간단락 5%)보다 크고, 고장 아닌 외란(여자돌입 0°)값 보다 큰 내부사고(충간단락 50% 0° 사고)사이의 공존하는 부분 즉, 사고인지 사고가 아닌지 명확하지 않은 부분을 애매한 구간(Fuzzy Region)으로 정하고, 변압기 과도신호의 특성을 기초로 변압기 보호용 외란 판단 기준 8가지를 다음과 같이 추출하였다. 차동전류 기본과 크기가 충간단락 5%이하면 확실시 사고가 아닌 구간(Crisp Non-Fault Region), 충간단락 50%이상이면 확실시 사고인 구간(Crisp Fault Region)이다.[5]

##### 3.2 외란 판단 기준 분석

###### ① 차동전류 기본파에 대한 2고조파 함유량

기준의 차동전류 계전기에서 사용하는 고조파 억제요소이다. 여자돌입과 다른 외란을 구분하는 기준이 된다.

$$F_1(n) = \frac{i_{d2-ph}(n)}{i_{d1-ph}(n)} > threshold \quad (1)$$

###### ② 차동전류 2고조파 변화율

①에서 제시한 기준의 보상요소로서, 외란 발생초기시 여자돌입외에 다른 외란도 2고조파가 많이 함유되어 있다. 그러나 다른 외란은 짧은 시간내에 사라지지만 여자돌입의 경우 오래 지속되어 여자돌입과 다른 외란을 구

분하는 기준이 된다.

$$F_2(n) = \frac{|I_{d_2-ph}(n)|}{|I_{d_2-ph}(n-1)|} < threshold \quad (2)$$

$I_{d_2} > threshold_2$  일 경우

여기서,  $i_{d_2-ph}$  : 각상의 차동전류  $i$ 고조파 성분  
 $n$  : 이산신호 index

### ③ 차동전류 기본파에 대한 5고조파 함유량

①과 마찬가지로 기존의 알고리즘에서 고조파 억제 요소다. 과여자와 다른 외란을 구분하는 기준이 된다.

$$F_3(n) = \frac{i_{5-ph}(n)}{i_{1-ph}(n)} > threshold \quad (3)$$

### ④ 차동전류의 5고조파 변화율

②와 마찬가지로 본 기준은 ③기준의 보상요소로 사용되는 기준이며 과여자와 다른 외란을 구분 할 수 있다.

$$F_4(n) = \frac{|I_{5-ph}(n)|}{|I_{5-ph}(n-1)|} < threshold \quad (4)$$

$I_{5} > threshold_5$  일 경우

### ⑤ 차동전류 파형

여자돌입전류의 차동전류를 분석해보면 과여자와 내부 사고와는 달리 같은 시간에 3상에서 똑같이 0에 가까운 값을 갖는 특징이 있다. 본 기준으로 여자돌입과 다른 외란을 구분 할 수 있다.

$$F_5(n) = \min_{k=0 \dots N-1} \left( \max_{m=0, \dots, [N/6], ph=A, B, C} |i_{d-ph}(n-k-m)| \right) \quad (5)$$

여기서,  $i_{d-ph}$  : 각 상의 차동전류 값

$N$  : 샘플링 수

### ⑥ 차동전류 기본파

내부사고의 경우 한상에서 차동전류가 발생 하지만, 여자돌입이나 과여자의 경우 3상모두 차동전류가 검출이 된다. 이 기준으로 내부사고와 다른 외란을 구분 할 수 있다.

$$F_6(n) = \bigwedge_{ph=A, B, C} ( |i_{d-ph}(n)| > H_{thd} ) \quad (6)$$

여기서,  $H_{thd}$  : 고조파 threshold

### ⑦ 1차측 단전 전압 rms의 변화

여자돌입과 과여자는 기본적으로 전압상으로 기인한 것이다. 반면 내부사고의 경우 사고상의 전압 rms값이 사고시점부터 작아진다. 이 기준으로 내부사고와 다른 외란을 구분 할 수 있다.

$$F_7(n) = \frac{|V_{rms-ph}(n)|}{|V_{rms-ph}(n-1)|} < threshold \quad (7)$$

여기서,  $V_{rms-ph}$  : 각상의 단자전압 rms값

### ⑧ 1차 단자 전압 적분값

일반적인 정현파의 적분시 반주기 데이터 창을 이용하면 항상 같은 값이 나오는 사실을 이용하여 정상상태 전압과 외란 상태에서 전압값을 비교할 수 있다. 이 기준은 과여자와 다른 외란을 구분 하는 기준이다.

$$F_8(n) = \int_0^{T/2} |V| dt > threshold \quad (8)$$

## 4. Fuzzy 추론

본 논문에서는 퍼지 척도(Fuzzy Measure)를 이용하여 다양한 기준을 종합 판단하는 새로운 개념의 계전 알고리즘을 제안하였다. 입력 정보와 계전기 정정치의 불확실성을 다루기 위해 퍼지화된 정보를 이용하여 bpa(basic probability assignment)를 결정하고, 최종적으로 MDS(Modified Dempster-Shafer)를 결합을 이용하여 최종 판단을 한다.

### 4.1. bpa 결정 방안

각 기준 별로 simulation을 통해 bpa 함수를 결정해야 하는데, 다음과 같은 규칙을 이용하여 bpa 함수를 정한다.

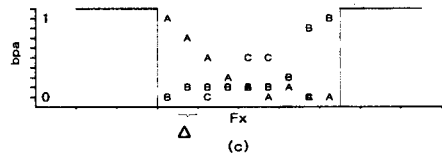
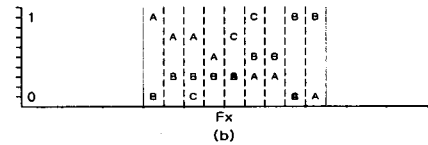
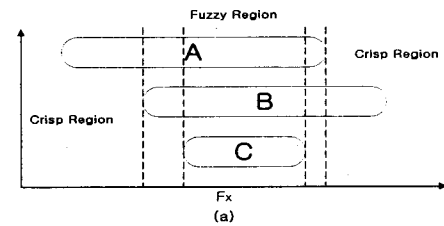


그림 2 bpa function 추출 과정

그림 2의 (a)와 같이 세가지 외란(A, B, C)가 같은 기준  $F_x$ 에서 그림과 같은 분포를 갖고 있는 경우 Fuzzy Region과 Crisp Region으로 나눌 수 있다. Fuzzy Region에서 기준  $F_x$ 의 크기를  $\Delta$ 로 나누면,  $\Delta$  구간의 밀집도를 0~1로 정규화 시켜 그림 2의 (b)와 같이 나타낸다. 그림 2의 (c)는 최종 bpa 함수로서 (b)의  $\Delta$ 구간에서의 각 외란간의 밀집도 비율을 나타내어 만든다.

위와 같은 규칙을 고려하여 3.2절에서 언급한 외란 판단 기준을 시간대별로 bpa 함수를 만들 수 있고, 이 소속함수를 이용하여 각 외란(여자돌입, 과여자, 내부사고)의 bpa를 시간의 추이에 따라 구할 수 있다.

### 4.2 Fuzzy Inference 방안

각 기준들의 bpa 함수와 실시간 데이터의 조합에서 나온 결과에 대한 bpa 결과 값( $m(F_{x_i}), i$ :외란의 종류,  $F_x$ :기준)

들을 효과적으로 고려하기 위한 방법으로 DS(Modified Dempster-Shafer) 결합 룰을 이용하였다. 그러나 Dempster-Shafer 결합 룰은 사람의 판단방법과 유사하다는 장점이 있지만 교집합이 없을 경우 결합이 안된다는 단점이 있어 이를 개선 한 MDS 결합 룰을 이용하였다.[8]

### 4.3 Modified Dempster-Shafer 결합 룰

두가지 증거(외란 판단 기준)를 Dempster-Shafer 룰 결합 시 기본적으로 교집합이 적용되는 가설(외란)들끼리 결합을 한다. 그러나 가설의 교집합이 없을 경우 결합이 안되어 결과 값이 나오지 않는 경우가 생긴다. 본 논문에서는 이를 개선한 MDS를 사용하였다.

룰 결합을 하기 전 교집합이 있는 증거들과 없는 증거들을 각각 Grouping을 하고 교집합이 있는 증거들은 기존의 DS 결합 룰인 식 (1)을 이용한다. 그리고 교집합이 없는 증거들의 모임은 식 (2)와 같은 MDS를 이용한다.

$$m_{1,2}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - K}, A \neq \emptyset \quad (1)$$

$$\text{여기서 } K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C), m_{1,2}(\emptyset) = 0.$$

식 (1)은 증거 B와 증거 C의 결합으로 A라는 새로운 증거로 만들고 있다.

$$m(E_{1-n}) = \frac{m(h_i)/E_1 + m(h_i)/E_2 + \dots + m(h_i)/E_n}{n} \quad (2)$$

여기서, n: 증거의 수, i:가설

### 5. 변압기 보호계전 시스템 구조

3.2절에서 언급한 외란 판단 기준과 4.1절에서 제안한 bpa함수를 이용한 변압기 보호 계전 알고리즘을 제시하였다. 이는 다음과 같은 방법으로 적용된다.

1.  $x_i$  입력
2.  $R_i = F_i(x)$
3.  $E_i = bpa_i(R_i)$
4.  $E_i = m(h_i), m(h_o), m(h_{int})$   
( $h_i$ : 여자돌입,  $h_o$ : 과여자,  $h_{int}$ : 내부사고)

위의 순서를 그림 3에 나타난 블록 다이어그램과 같이 보면 1·2차측 전류와 전압의 순시치를 가져와 각 외란 판단 기준에 필요하게 변환하여 준 뒤, 그 값( $x_i$ )들을 각 해당 기준( $R_1 \sim R_n$ )에 대입하고, 그 결과는 각각의 bpa 함수 ( $bpa F_1 \sim bpa F_n$ )를 통해  $m(h_i), m(h_o), m(h_{int})$  값의 집합인 증거의 집합  $E_i$ 로 나타난다. 각 외란 판단 기준 bpa함수에서 나오는 값은 최종 MDS 결합 룰을 이용하여 내부사고인지, 여자돌입 혹은 과여자인지를 판단한다.

### 결론

본 논문에서는 Fuzzy 추론을 이용한 변압기 보호 계전 알고리즘을 제시하였다. EMTP를 이용하여 과도상태를 분석하였고, 그 결과 8가지의 외란 판단 기준을 추출하였다. 또한 시간대 별로 적용할 수 있는 소속함수를 정의하였으며, 그 결과로 나오는 bpa를 보다 효율적으로 결합하는 방법으로 MDS를 사용하여 보다 신뢰도 높은 변압기 보호 계전 알고리즘 제안하였다.

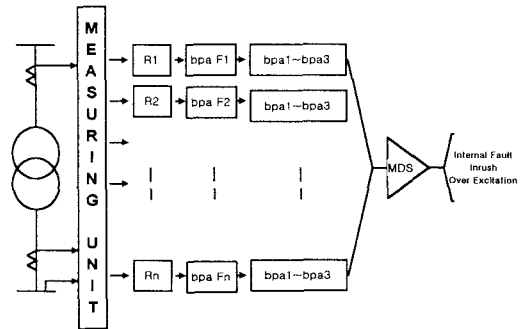


그림 3 변압기 보호 계전 알고리즘의 기본 구조

### 5. 참고문헌

- [1] A. Wiszniewski, B. Kasztenny, "A Multi-Criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10 No. 4, October 1995, pp.1786-1792
- [2] B. Kasztenny, E. Rosolowski, M. M. Saha, B. Hillstrom, "A Self-Organizing Fuzzy Logic Based Protective Relay - An Application to Power Transformer Protection", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 3, July 1997, pp.1119-1127
- [3] ATP Rule BOOK, ATP Salford version of EMTP Vol. I., II.
- [4] P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9 No. 2, April 1994, pp.690-699
- [5] 김상태, 이승재, 진보건동, "3상 변압기 보호를 위한 외란 판단기준", 대한전기학회 전력계통연구회 춘계 학술대회 논문집, 2000.5.20. pp21~24.
- [6] ABB, Protective Relaying Theory and Applications, Marcel Dekker Inc., 1994, pp.145-185
- [7] J. Lewis Blackburn, Protective Relaying Principles and Applications, Second Edition, Marcel Dekker Inc., 1998, Chap9, pp.275-326
- [8] Seung-Jae Lee, Sang-Tae Kim et al., "Protection Level Evaluation of Distribution System Based on Dempster-Shafer theory of Evidence" IEEE PES WM 2000. 2000.1.23