

## Disturbance State Identification of Power Transformer Based on Dempster's Rule of Combination

姜相熙\* · 李承宰\*\* · 權泰元\*\*\* · 金尙泰<sup>§</sup> · 姜龍澈<sup>§§</sup> · 朴鍾根<sup>§§§</sup>

(Sang-Hee Kang · Seung-Jae Lee · Tae-Won Kwon · Sang-Tae Kim · Yong-Cheol Kang · Jong-Keun Park)

**Abstract** - This paper proposes a fuzzy decision making method for power transformer protection to identify an internal fault from other transient states such as inrush, over-excitation and an external fault with current transformer (CT) saturation. In this paper, analyzing over 300 EMTP simulations of disturbances, four input variables are selected and fuzzified. At every sampling interval from half to one cycle after a disturbance, from the EMTP simulations, different fuzzy rule base is composed of twelve if-then fuzzy rules associated with their basic probability assignments for singleton- or compound-support hypotheses. Dempster's rule of combination is used to process the fuzzy rules and get the final decision. A series of test results clearly indicate that the method can identify not only an internal fault but also the other transients. The average of relay operation times is about 12 (ms). The proposed method is implemented into a Digital Signal Processor (TMS320C31) and tested.

**Key Words** : Protective relay, Power transformer protection, Basic probability assignment, Dempster-Shafer's theory of evidence, Fuzzy decision making

### 1. 서 론

보호 계전기는 계기용 변성기로부터 전압, 전류 등의 계전 신호를 입력으로 받아들여 이를 처리한 후, 연산한 값을 미리 정해놓은 임계값과 비교하여 동작한다. 그런데, 전류와 같은 계전 신호에는 변류기 포화 등으로 인하여 입력 오차가 어느 정도 포함되어 있을 수 있어, 계전기가 사고를 판단하는 과정에서 오류를 유발할 수 있는 원인이 되기도 한다.

그리고, 사고 저항이 0인 사고가 발생한 경우에는 전류와 같은 계전 신호의 값이 정상 상태에 비해 크게 변하지만, 어떤 사고의 경우에는 전류의 값이 정상 상태에 비해 크게 변하지 않기도 한다. 반면, 변압기의 여자돌입 현상처럼 사고가 아닌 경우에도 사고가 발생한 경우처럼 전류가 크게 변하기도 한다. 따라서, 사고와 사고가 아닌 외란을 구분하는 데 어려움이 있다.

앞에서 언급한 두 가지 이유 때문에, 보호 계전기 특히, 변압기 보호 계전기와 같은 경우에는 한 가지 기준만으로는 여자 돌입 및 과여자 와 같은 외란을 사고와 정확하게 구분하는 것이 어렵다.

발전기, 송전선의 경우와 마찬가지로 변압기 보호용으로 전류차동 (current differential) 방식이 주로 사용되어 왔다. 그런데, 이 방식 단독으로는 내부 사고와 내부 사고가 아닌 외란 즉, 여자 돌입, 과여자, 변류기 포화를 수반한 외부사고를 명확하게 구분하기 어렵다. 이러한 경우 계전기의 오동작을 방지하기 위하여 변압기 투입시 일시적으로 동작을 중단하는 방식, 감도저하 방식, 고조파 억제방식 등이 제안되었다 [1-4]. 그러나 이러한 방법들은 변압기 투입시 사고발생에 대한 보호가 불가능하며, 계통 변화에 따른 과도상태 고조파 발생 특성변화로 변압기 내부사고시 차단지연 또는 계전기의 부동작을 초래할 수 있다 [2]. 또한 변압기 철심 재질의 변화와, 경제적 이유에 의한 변압기 철심의 설계방식의 변화에 따라 여자 돌입시 2조파가 적게 발생하게 되고, 반면에 고압화와 지중화에 따른 커패시턴스가 큰 계통일수록 내부 사고시에도 차동 전류에 2조파가 많이 포함되어 고조파 억제방식은 수정이 불가피하게 되었다 [4].

이와 같은 필요에 의하여 최근에, 변압기 보호용으로 퍼지 논리를 이용한 방식이 제안되었다 [5,6]. 이 방식은 트립 결정에 필요한 판단 기준의 모호성을 처리하기 위해 여러가지 기준을 사용하여 변압기 보호용 퍼지 로직을 구성하였으며, 변압기 내부 사고 여부만을 판단하였다.

본 논문에서는 변압기의 내부 사고와 내부 사고가 아닌 과

\* 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 副教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 教授 · 工博

\*\*\* 準 會 員 : 明知大 電氣工學科 碩士課程

§ 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 博士課程

§§ 正 會 員 : 全北大 電子情報工學部 傳任講師 · 工博

§§§ 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 1月 28日

最終完了 : 1999年 10月 25日

도 상태 즉, 여자 돌입, 과여자, 변류기 포화를 수반한 외부사고를 구분할 수 있는 퍼지 결정 방식을 제안한다. 제안된 방식은 300 개지가 넘는 EMTP 모의 데이터로부터, 4개의 입력 변수를 선택하였고 이를 퍼지화 하였다. 외란 이후의 반주기부터 한 주기까지 각 샘플링 순간마다 12개의 if-then 퍼지 룰을 구성하였다. 또한, 여러개의 퍼지 룰을 결합하기 위하여 Dempster의 룰결합 방식을 사용하였다. 또한, 제한된 계전 알고리즘을 TMS320C31 디지털 신호 처리 칩을 사용한 보드에 구현하여 성능을 검증하였다.

2. 퍼지 결정 알고리즘

보호계전기는 보호 대상에 사고가 발생했는지의 여부를 정확하게 판단해야 한다. 그런데 입력 계전 신호에 포함된 오차와 판단 결정과정에서의 기준의 모호함 때문에 판단의 신뢰도가 떨어지게 된다. 따라서 판단 결정의 신뢰도를 개선하기 위하여는 다기준을 사용하여 종합적인 판정방식이 요구된다.

변압기의 상태를 고장과 비고장상태로 정의할 때 이에 불확실성이 없으며, 변압기의 과도상태 정보를 근거로 현재의 상태가 고장상태인가 아닌가의 판정에는 불확실성이 존재하므로 이는 퍼지이론중 퍼지측도의 문제에 해당한다. 본 연구에서는 Fuzzy 측도의 이론중 가장 효율적인 방식으로 알려진 Dempster-Shafer의 증거 이론 [6,7]을 적용한 상태판정 방안을 제안한다

본 연구에서는 증거로서 변압기의 1, 2차 전류로부터 얻은 4개의 신호를 입력 신호로 사용하였으며, 이를 토대로 각 샘플링 순간에서의 퍼지 룰 베이스를 구성하였다. 변압기의 4가지 상태 즉, 내부 사고, 여자 돌입, 과여자, CT의 포화를 수반한 외부사고 등을 구분하기 위해 Dempster의 결합 방식을 이용하여 룰을 결합하였다. 전체 집합 (discernment H)은 4가지 변압기 상태로 구성되었으며, 각 부분집합에 대한 지지도 (basic probability assignment, BPA)를 얻기 위하여, 먼저 입력 변수에 대한 퍼지 집합을 정의하였다.

2.1 퍼지 입력 변수와 퍼지 멤버쉽 함수

EMTP를 이용하여 300개 이상의 경우로 4가지 변압기 상태를 모의하였다. 본 논문에서는 이의 분석을 통하여 상태를 구분하기 위해 변압기 과도신호의 특성을 기초로 4개의 입력 변수를 선택하였으며, 이를 식 (1) - 식 (4)에 나타내었다.

$$f_1(n) = I_{a1}(n) \tag{1}$$

$$f_2(n) = \frac{I_{a2}(n)}{I_{a1}(n)} \tag{2}$$

$$f_3(n) = \frac{I_{a3}(n)}{I_{a1}(n)} \tag{3}$$

$$f_4(n) = N_1 I_1(n) \times N_2 I_2(n) \times N_3 (360^\circ - \Delta\theta) \tag{4}$$

여기서,  $f_i(n)$ ,  $i=1, \dots, 4$  : 입력변수

$I_{a1}(n)$ ,  $I_{a2}(n)$ ,  $I_{a3}(n)$  : 차동전류의 기본파,  
2조파, 5조파 성분의 크기

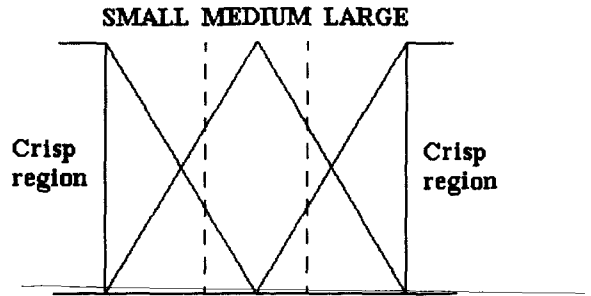


그림 1 퍼지 멤버쉽 함수  
Fig. 1 Fuzzy membership function

$I_1(n), I_2(n)$  : 변압기 1, 2차 전류의  
기본파 성분의 크기  
 $\Delta\theta$  :  $I_1(n)$ 과  $I_2(n)$ 의 위상차  
 $N_1, N_2, N_3$  : 상수

변압기에서 발생하는 모든 과도상태는 차동전류 기본파 성분의 크기를 증가시키므로 식(1)은 외란의 발생여부를 검출하는 역할을하며 식(2)는 이러한 외란 중에서 여자돌입현상을 특징짓는 2조파 성분의 크기를 판정하는 식이다. 식(3)은 과도신호의 5조파 성분을 기준으로 과여자를 구분하며 식(4)는 변압기 1, 2차측 전류와 그 위상차를 기준으로 외부사고를 판단하는 주요기준을 나타내고 있다.

이러한 입력변수는 그 식이 판별하고자 하는 과도상태에 대한 주 특징만이 아니라 다른 과도상태에 대한 정보도 포함하고 있어 불확실성으로 나타나게 된다. 따라서 모든 입력 변수를 다음과 같은 방식을 사용하여 퍼지화 하였다. EMTP를 이용하여 4가지 상태를 모의한 데이터로부터, 각 입력 변수의 값에 의한 상태의 분포를 조사하였다. 그 결과, 각 입력 변수에 대하여 한 가지 상태만 나타나는 영역이 두개 존재하는데 이를 crisp 영역이라고 정의하였다. 또한, 두 crisp 영역 사이에 두 가지 이상의 상태가 존재하는 영역이 존재하는데 이를 퍼지 영역으로 정의하였다. 본 논문에서는 이 퍼지 영역을 입력 변수의 크기에 따라 등간격으로 3등분하여 SMALL (S), MEDIUM (M), LARGE (L)의 세 개의 퍼지 집합으로 정의하였다. 그 영역을 구분하는 과정에서의 모호성을 고려하기 위하여, 그림 1에 나타난 바와 같이 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 갖도록 하였다. 따라서, 입력 변수가 어떤 값을 갖게 되면, 두 가지 퍼지 집합 (SMALL 또는 LARGE 중의 하나와, MEDIUM)에 대한 멤버쉽 값을 각각 갖게 된다.

2.2 퍼지 룰 베이스

퍼지 룰 베이스를 생성하는 과정은 다음의 2단계로 이루어져 있다. 첫 단계는, EMTP 데이터를 분석한 결과로부터, 3개의 퍼지 영역에서 각 상태에 대한 지지도를 구한다. 이 값은 입력 변수에 의하면 '상태 i 가 참'이라는 가설을 지지하는 정도를 나타내며, 식 (5)에 나타난 바와 같이, 해당되는 영역에 속해 있는 상태의 수에 의해 얻어진다.

$$BPA: \frac{1}{i}m = \frac{N_i}{N} \quad (5)$$

여기서,  $N_i, N$  : 해당 영역에 존재하는 상태  $i$  의 수 및 모든 상태의 총수  
 윗첨자 1 : 지지도를 구하는 단계 1을 의미

이렇게 해서, 각 영역에서 4개의 상태에 대한 BPA를 얻게 된다.

2단계에서는, 1단계에서 얻은 4개의 상태에 대한 지지도로부터 지지도가 가장 높은 가설을 선택하고 그 가설의 지지도를 이끌어 낸다. 여기서 선택된 가설은 하나의 상태만으로 이루어져 있을 수도 있고 두개 이상의 상태로 이루어져 있을 수도 있다. EMTP 모의 데이터로부터 얻은 1단계의 지지도에는 모델링 및 실험데이터 오차, 모의 횟수 제한 등으로 인한 불확실성이 포함되어 있어 이를 식 (6)과 같은 방법으로 해당 영역에 존재할 수 있는 여러가지 가설 중에서 가장 지지도가 높은 가설과 그의 지지도를 얻는다. 본 연구에서는 20%의 불확실성을 상정하였으며 이 값의 3배인 0.6을 기준으로 모의결과로부터 의미있는 가설만을 추출하도록 하였다.

식 (6)의 (i)는 지지도가 가장 높다고 여기는 상태가 하나만인 경우에 해당되는 것이며, 이 경우를 단순 가설 (singleton-support hypothesis)이라 한다. 해당 영역에서 어떤 상태  $i$  에 대한 지지도가 0.6보다 큰 경우에는, 변압기가 상태  $i$ 에 있을 가능성이 나머지 세가지 상태에 있을 가능성보다 매우 높으므로, 이 상태를 선택한다. 또한, 그 가설에 대한 지지도는 1단계에서의 지지도와 같은 값을 갖게 된다. 또한, 나머지 집합  $H$ 에 대한 지지도는 1에서 0.6보다 큰 지지도 값을 뺀 값을 갖게된다.

식 (6)의 (ii)는 지지도가 높다고 여기는 상태가 두개 이상인 경우에 해당하고, 이 경우를 복합가설 (double or triple compound-support hypothesis)이라 하며, 이를 두 가지로 나누어서 구하였다. 그 하나는, 해당 영역에서 가장 큰 두 개의 지지도의 차가 0.2보다 작고, 그 합이 0.6보다 크면, 변압기가 상태  $i$  또는  $j$ 에 있을 가능성이 가장 높다는 것을 의미하므로, 상태  $i, j$  를 지지도가 가장 높은 가설로 선택한다. 그리고, 그 가설에 대한 지지도는 1단계에서의 각 상태에 대한 지지도의 합으로 나타낸다. 또, 다른 하나는 해당 영역에서 가장 큰 세 개의 지지도의 차가 각각 0.2보다 작고, 그 합이 0.6보다 크면, 변압기가 상태  $i, j$  또는  $k$ 에 있을 가능성이 가장 높다는 것을 의미하므로, 상태  $i, j, k$  를 지지도가 가장 높은 가설로 선택하고, 그 가설에 대한 지지도를 1단계에서의 각 상태에 대한 지지도의 합으로 나타낸다.

(i) if  $\frac{1}{i}m \geq 0.6$  then  $\frac{2}{i}m = \frac{1}{i}m$  and  $\frac{2}{H}m = 1 - \frac{2}{i}m$

(ii) Otherwise

1) if  $|\frac{1}{i}m - \frac{1}{j}m| \leq 0.2$  and  $\frac{1}{i}m + \frac{1}{j}m \geq 0.6$

then  $\frac{2}{i,j}m = \frac{1}{i}m + \frac{1}{j}m$  and  $\frac{2}{H}m = 1 - \frac{2}{i,j}m$

2) if  $|\frac{1}{i}m - \frac{1}{j}m| \leq 0.2$  and  $|\frac{1}{j}m - \frac{1}{k}m| \leq 0.2$

and  $|\frac{1}{k}m - \frac{1}{i}m| \leq 0.2$  and  $\frac{1}{i}m + \frac{1}{j}m + \frac{1}{k}m \geq 0.6$

then  $\frac{2}{i,j,k}m = \frac{1}{i}m + \frac{1}{j}m + \frac{1}{k}m$

$$\text{and } \frac{2}{H}m = 1 - \frac{2}{i,j,k}m \quad (6)$$

여기서,  $\frac{1}{i}m \geq \frac{1}{j}m \geq \frac{1}{k}m$

예를 들면, 입력 변수  $f_1(n)$ 의 LARGE 라는 퍼지 영역에서 4가지 상태의 1단계 지지도가 다음 값을 갖는다고 하자.

$$\frac{1}{i}m = 0.5, \frac{1}{j}m = 0.3, \frac{1}{k}m = 0.1, \frac{1}{l}m = 0.1$$

그러면, 2단계에서는 식 (6)의 (ii)로부터, 다음과 같은 룰이 생성된다.

$$\text{IF } f_1(n) \text{ is LARGE, THEN } \frac{2}{i,j}m = 0.8, \frac{2}{H}m = 0.2$$

위와 같은 방식으로 구성된 퍼지 룰 베이스는 입력 변수가 4개이고, 각 변수에서 퍼지 영역이 3개이므로, 12개의 퍼지 룰로 이루어져 있다.

그런데, 외란 이후의 입력 변수는 과도시에 존재하는 직류 옴셋 성분과 고조파 성분으로 인하여 시간에 따라 다른 값을 갖게 된다. 따라서, 시간이 달라지면 입력 변수의 퍼지 멤버십 값이 달라질 뿐만 아니라 각 상태에 대한 지지도도 달라지게 된다. 그러므로, 본 논문에서는 EMTP 모의 데이터로부터 샘플링 순간마다 다른 퍼지 룰 베이스를 구성하였다. 외란 직후 매우 왜곡된 계전 신호에 의한 계전기의 오동작을 방지하기 위하여 초기 반주기까지는 판단을 유보하고, 외란 이후 반주기부터 한 주기까지 각 샘플링 순간에서 퍼지 룰 베이스를 구성하였다. 한편, 한 주기 이후의 퍼지 룰 베이스는 한 주기에서의 퍼지 룰 베이스를 사용한다. 따라서 퍼지 룰 베이스는 96개(12\*8)의 퍼지룰로 구성되어 있다.

### 2.3 Dempster의 결합법칙을 이용한 퍼지 추론

2.2절에서 구성된 퍼지 룰의 지지도에는 입력 변수의 크기가 고려되지 않았다. 따라서, 입력 변수를 고려하기 위하여, 2.2에서 얻은 지지도에 입력 변수의 퍼지 멤버십 값을 곱하였고, 그 결과값을 수정된 지지도(3단계 지지도  $\frac{3}{i}m$ )라 하였다.

그림 1에서 나타난 바와 같이, 입력 변수의 한 값은 세계의 퍼지 집합 중에서 두 가지의 퍼지 집합에만 해당되므로, 각 샘플링 순간에는 12개의 룰 중에서 8개의 룰만이 선택이 되고, 선택된 8개의 룰에서는 가설과 함께 입력 변수의 크기가 고려된 수정된 지지도가 사용된다.

매 샘플링력시 위와 같은 과정을 통해서 얻어진 8개의 룰에 대한 수정된 지지도(3단계 지지도)는 Dempster의 룰 결합 방식에 의하여 결합된다.[6] 임의의 두 룰 a, b의 가설 B, C의 지지도는 식 (7)을 이용하여 새로운 가설 A에 대한 지지도로 결합된다.

$$\frac{3}{A}m_{a,b} = \frac{\sum_{B \cap C = A} \frac{3}{B}m_a \cdot \frac{3}{C}m_b}{1 - K} \quad (7)$$

여기서,  $A \neq \emptyset, K = \sum_{B \cap C = \emptyset} \frac{3}{B}m_a \cdot \frac{3}{C}m_b$

$$\frac{3}{\emptyset}m_{a,b} = 0, A, B, C \in H$$

식 (7)에서, 새로운 가설 A의 지지도  ${}^3_A m_{a,b}$ 는  ${}^3_B m_a$ (를 a에 의한 가설  $B \in H$ 의 3단계 지지도)와  ${}^3_C m_b$ (를 b에 의한 가설  $C \in H$ 의 3단계 지지도)를 곱하여 결정된다.

이런 과정을 통하여 8개의 룰을 결합하면 단순가설 및 복합가설에 대한 지지도를 얻게 되며 최종 결론 도출에는 추출에 있어서 단순가설 지지도의 신뢰도가 복합가설보다 높은 까닭에 복합 가설의 지지도를 구성 단순가설의 지지도에 비례하여 나누어 단순가설의 지지도에 더하는 방법을 취하였다. 이렇게하여 최종적으로는 4개의 단순 가설에 대한 지지도를 얻게 된다.

위와 같은 과정을 통하여 얻은 4개의 단순 가설에 대한 지지도 중, 가장 큰 지지도가 정해진 임계값보다 크고, 두 번째로 큰 지지도의 두 배보다 크면, 변압기가 가장 높은 지지도를 갖는 가설이 지지하는 상태에 있다고 결정하였다. 그렇지 않은 경우에는 그 샘플 순간에는 결정을 유보하고 다음 샘플로 넘어간다. 본 논문에서는 각 샘플링 순간마다 임계값을 다르게 정하였으며, 그 값은 0.9 ~ 0.6 사이이다. 외란 발생후 반주기에서의 임계값이 0.9로 높고, 외란후 한주기에서의 임계값이 0.6으로 낮은 이유는 외란의 초기일수록 DFT에 의한 페이서 연산값이 부정확하여 최종 추론 결과값의 신뢰도가 떨어질 수 있으므로 지지도가 상당히 높지 않으면 판단을 유보한다는 것을 반영한 것이다. 만약 외란 이후 10주기가 될 때까지 과도신호가 지속되고 있음에도 불구하고 아무런 결정을 내리지 못하면, 가장 높은 지지도에 해당하는 가설의 상태에 있다고 결정한다. 이 때 판단도중 사고가 제거되었을 경우 판단은 중지된다.

### 3. 사례 연구

제시한 방식을 검증하기 위하여 사용한 모델 계통을 그림 2에 나타내었다. EMTP를 이용하여 300 가지가 넘는 변압기의 4가지 상태 즉, 내부 사고, 여자 돌입, 과여자, CT포화를 수반한 외부 사고를 모델링 하였다. 계통 전압은 154[kV] 이고, 샘플링 주파수는 60[Hz] 시스템에서 960 [Hz] 즉, 주기당 16 샘플을 하였다. 변압기 내부 사고를 모델링 하기 위하여 참고 문헌 [8]에 제시되어 있는 방법을 사용하였다. 또한, 변압기의 여자 돌입 및 과여자 등 포화 특성을 표현하기 위하여 변압기의 히스테리시스 특성까지 모델링하였고, 이를 위하여 EMTP의 보조 프로그램인 HYSDAT을 사용하였다.

4개의 입력 변수를 3개의 구간으로 나누어 퍼지 멤버십 함수를 구성하였으며, 2.2절에서 설명한 방식 대로 외란 발생후 반주기 후부터 한주기에 이르기까지 매 샘플링 순간마다 12개의 룰로 이루어진 룰 베이스를 구성하였고, 이 중 세 샘플순간의 룰 베이스를 표 1에 나타내었다. 표 1에서의 지지도의 아래첨자는, 그 지지도에 해당하는 가설을 의미한다.

#### 3.1 내부 사고

사고가 난 권선 위치에 따른 120가지의 지락 사고, 단락 사고 등 내부 사고를 시험하였다. 그림 3에 2% 단락 사고의 경우의 1차, 2차 전류와 트립 신호가 나타나 있다. 이 경우 계전기 동작 시간은 약 14 (ms)이었다.

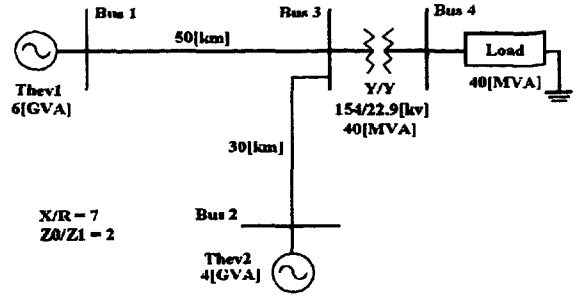


그림 2 모델 시스템  
Fig. 2 Model system

표 1 퍼지 룰 베이스

Table 1 Fuzzy rule bases

F : 사고, I : 여자돌입, O : 과여자, E : 외부사고

외란후 샘플수		입력 변수			
		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
9	S	${}^2_{O,E}m=0.81$ ${}^2_{I}m=0.19$	${}^2_{I}m=0.78$ ${}^2_{H}m=0.22$	${}^2_{I,E}m=0.62$ ${}^2_{H}m=0.38$	${}^2_{I,O}m=0.66$ ${}^2_{H}m=0.34$
	M	${}^2_{I}m=0.71$ ${}^2_{H}m=0.29$	${}^2_{F,I}m=0.63$ ${}^2_{H}m=0.37$	${}^2_{F,O}m=0.76$ ${}^2_{H}m=0.24$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$
	L	${}^2_{I}m=0.64$ ${}^2_{H}m=0.36$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{O}m=0.80$ ${}^2_{H}m=0.20$	${}^2_{E}m=0.75$ ${}^2_{H}m=0.25$
12	S	${}^2_{O,E}m=0.80$ ${}^2_{H}m=0.20$	${}^2_{I}m=0.67$ ${}^2_{H}m=0.33$	${}^2_{H}m=1.00$	${}^2_{I,O}m=0.68$ ${}^2_{H}m=0.32$
	M	${}^2_{I}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{I,E}m=0.63$ ${}^2_{H}m=0.37$	${}^2_{F,E}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$
	L	${}^2_{I}m=0.72$ ${}^2_{H}m=0.28$	${}^2_{F,I}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{O}m=0.63$ ${}^2_{H}m=0.37$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$
16	S	${}^2_{O,E}m=0.79$ ${}^2_{H}m=0.21$	${}^2_{O,E}m=0.64$ ${}^2_{H}m=0.36$	${}^2_{F,E}m=0.60$ ${}^2_{H}m=0.40$	${}^2_{I,E}m=0.68$ ${}^2_{H}m=0.32$
	M	${}^2_{I,O}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{O}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$
	L	${}^2_{I}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{I}m=0.80$ ${}^2_{H}m=0.20$	${}^2_{I,O}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$	${}^2_{F}m=0.90$ ${}^2_{H}m=0.10$

지락 사고 및 단락 사고에 대한 결과가 표 2에 요약되어 있으며, 제시한 계전알고리즘은 테스트한 모든 내부 사고에 대하여 정확하게 내부 사고임을 판단함을 알 수 있다. 모든 내부사고의 경우에서 계전기 동작시간은 사고 후의 한 주기보다 적었으며, 평균 동작 시간은 사고 후 약 12 (ms)였다. 권선의 끝단(중성점)쪽에서 일어난 사고일수록 사고전류가 작아 계전기의 동작 시간이 길어짐을 알 수 있다.

#### 3.2 기타 외란

제시한 방식은 변압기에 사고가 발생했는지의 여부를 판정할 뿐만 아니라, 내부 사고가 아닌 경우에 외란의 종류를 판정할 수 있다. 그림 4는 여자 돌입, 과여자, 외부사고의 경우의 계전 신호와 트립 신호를 보여주고 있다. 이 경우들은 내부 사고가 아니므로, 계전기가 동작하지 않음을 알 수 있다.

세가지 종류의 외란 180개를 테스트하였으며, 표 3에는 외

표 2 내부사고의 결과

Table 2 Results (last BPAs) of internal faults

0,90 : 사고 위상각 n% : 사고난 권선의 위치  
 G : 내부지락, L : 권선간단락, T : 층간단락  
 F : 내부사고, I : 여자돌입, O : 과여자, E : 외부사고

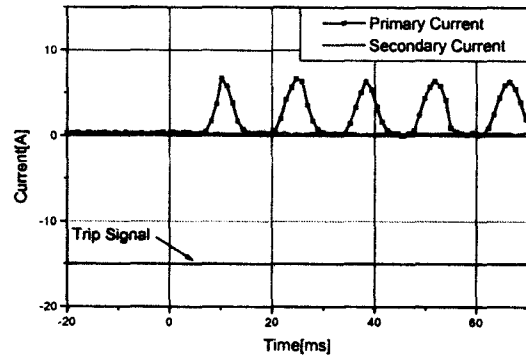
외란종류	판단시간 (외란후 샘플수)	최종 지지도				판단결과
		F	I	O	E	
G0	12	1.00	0.00	0.00	0.00	F
L0	12	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T2%0	14	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T2%90	13	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T5%0	10	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T5%90	13	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T10%0	10	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T10%90	10	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T50%0	10	1.00	0.00	0.00	0.00	F
T50%90	10	1.00	0.00	0.00	0.00	F

표 3 기타 외란의 결과

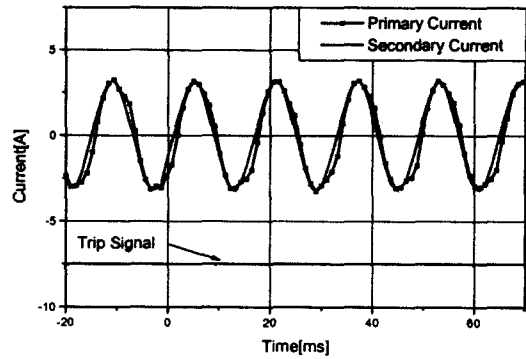
Table 3 Results (last BPAs) of other disturbances

0,90 : 사고 위상각, n% : 과전압, F : 내부사고  
 EG : 외부지락, I : 여자돌입, O : 과여자, E : 외부사고

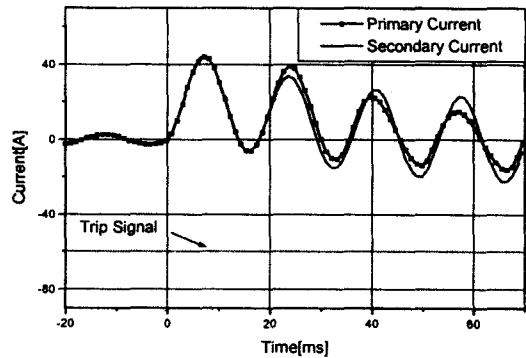
외란종류	판단시간 (외란후 샘플수)	최종 지지도				판단결과
		F	I	O	E	
EG0	10	0.00	0.00	0.00	1.00	E
EG90	11	0.00	0.00	0.00	1.00	E
I0	11	0.00	1.00	0.00	0.00	I
I20	15	0.21	0.77	0.01	0.01	I
I40	14	0.16	0.81	0.02	0.01	I
O120%	10	0.00	0.00	1.00	0.00	O
O130%	12	0.00	0.00	1.00	0.00	O



(a) 여자돌입  
(a) Inrush



(b) 120% 과여자  
(b) 120% Over-excitation



(c) 변류기 포화를 수반한 외부사고  
(c) External fault with CT saturation

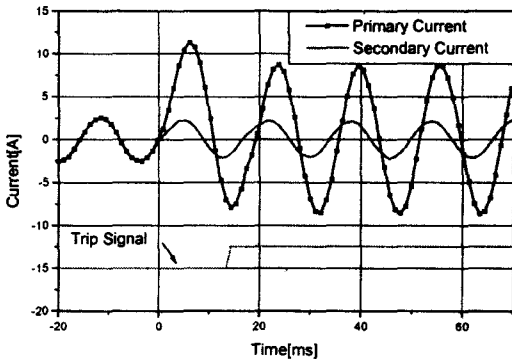


그림 3 2% 층간단락사고에 대한 계전 및 트립 신호  
 Fig. 3 Relaying and trip signals for a 2% turn-to-turn fault

그림 4 기타 외란에 대한 계전 신호와 트립 신호  
 Fig. 4 Relaying and trip signals of other disturbances

부사고(0도, 90도 사고), 여자돌입(투입 위상각 0도, 20도, 40도), 과여자(120%, 130%)의 결과가 나타나 있다. 시험 결과 모든 외란이 발생한 이후의 한주기 이내에 정확히 구분됨을 알 수 있다.

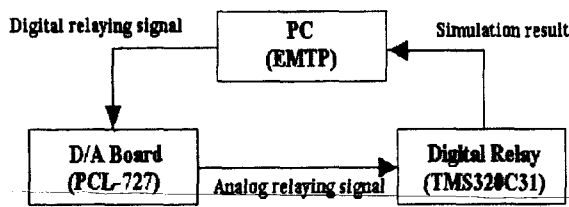


그림 5 계전기 시험 시스템  
Fig. 5 Relay test system

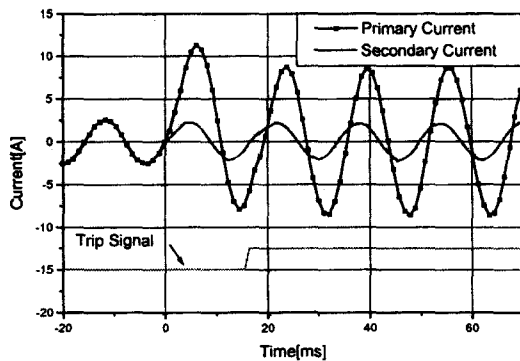


그림 6 2% 층간 단락 사고의 H/W 시험 결과  
Fig. 6 H/W test result for a 2% turn-to-turn fault

### 3.3 H/W 시험

제시한 방식의 실시간 시험을 위한 시스템의 구조가 그림 5에 나타나 있다. 이는 EMTP 데이터로부터 아날로그 신호를 생성해 주는 D/A 보드와, 제시한 방식이 구현되어 있는 TMS320C31 디지털 신호 처리 보드로 구성되어 있다.

그림 3의 2% 층간 단락 사고에 대하여, 실시간 시험을 실시한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 디지털 신호처리 칩을 이용한 경우, 실시간으로 제시된 알고리즘이 수행됨을 알 수 있다. 다만, 그림 6의 결과가 그림 3의 결과 보다 트립 순간이 한 샘플 늦음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 변압기 보호알고리즘에 사용되는 Dempster의 결합 방식을 이용한 새로운 퍼지 결정 방식을 제시하였다. 1차, 2차 전류로부터 4가지의 입력 신호를 만들었고, 이를 퍼지화 하였다. 300가지의 EMTP 모의를 통하여 변압기의 4가지 상태 즉, 내부사고, 여자돌입, 과여자, 변류기 포화를 수반하는 외부사고를 구분 판단하기 위한 룰 베이스를 구성하

였다. 여러가지 룰로부터 Dempster의 룰 결합 방식을 이용하여 룰을 결합하여, 최종적으로 변압기의 4가지 상태에 대한 지지도를 구하였다. 외란 이후에 매 순간마다 입력 값이 변하므로, 외란 후의 반주기 후부터 한주기까지 매 샘플링 순간에 서로 다른 퍼지 룰 베이스를 구성하였다. 여러 가지 테스트 결과 제시한 방식이 성공적으로 동작하고 있음을 확인하였다. 제시한 방식은 외란이 발생하였을 때 내부 사고의 유무를 판정할 뿐만 아니라 외란의 종류도 구분할 수 있다. 기존의 계전기와 비교실험을 하지는 못하였으나 본 연구에서 제시한 판정방법은 기존의 판단기준만이 아니고 새로운 판단기준을 추가하여 종합 판단하고 있기 때문에 종래의 방법보다 판단의 신뢰도가 높을 것으로 기대한다. 그러나 앞으로 실 적용테스트를 통한 기존의 계전기와와의 성능비교 및 실 적용화연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] I. Hermanto, Y. V. V. S. Murty, M. A. Rahman, "A Stand-alone Digital Protective Relay for Power Transformers", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 6 No. 1, January 1991, pp.85-95
- [2] P. Liu, O. P. Malik, D. Chen, G. S. Hope, Y. Guo, "Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 4, October 1992, pp.1912-1919,
- [3] ABB, Protective Relaying Theory and Applications, Marcel Dekker Inc., 1994, pp.145-185
- [4] J. Lewis Blackburn, Protective Relaying Principles and Applications, Second Edition, Marcel Dekker Inc., 1998, Chap9, pp.275-326
- [5] 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
- [6] 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,
- [7] George J. Klir, Tina A. Folger, Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice Hall, 1992, pp.107-137
- [8] John Yen, "Generalizing the Dempster-Shafer Theory to Fuzzy Sets", IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, 1990, pp.559-570
- [9] 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

저 자 소 개

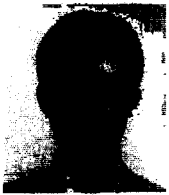


강 상 회 (姜相熙)

1962년생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 부교수.

Tel : (0335) 330-6364

E-mail : shkang@wh.myongji.ac.kr

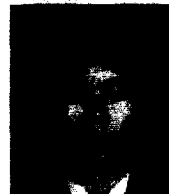


이 승 재 (李承宰)

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년 Univ. of Washington 교환교수. 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 교수.

Tel : (0335) 330-6362, Fax: (0335) 321-0271,

E-mail : sjlee@wh.myongji.ac.kr

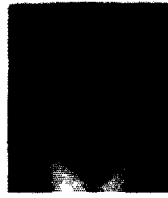


권 태 원 (權泰元)

1972년 10월 21일생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (0335) 336-3280

E-mail : dosto@wh.myongji.ac.kr



김 상 태 (金尙泰)

1971년 2월 15일생. 1995년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (0335) 336-3290

E-mail : miserere@wh.myongji.ac.kr

강 용 철 (姜龍澈)

전기학회 논문지 제48권 제2호 참조

Tel : (0652) 270-2391

E-mail : yckang@moak.chonbuk.ac.kr

박 종 근 (朴鍾根)

전기학회 논문지 제48권 제5호 참조

Tel : 880-7257

E-mail : jkpark@plaza1.snu.ac.kr