

Fuzzy 추론을 이용한 전력용 변압기 보호계전 알고리즘

김상태, 이승재, 강상희, 최면송, 윤상현, 이태성
 명지대학교 (주) 프로그 시스템

Power Transformer Protective Relaying Algorithm based on Fuzzy Decision Making

Sang-Tae Kim, Seung-Jae Lee, Sang-Hee Kang Myeon-Song Choi Sang-Hyun Yoon Tae-Sung Lee
 Myongji University, Yongin Procom System. co.

Abstract - The two fuzzy criteria to distinguish the internal fault from the inrush for the power transformer protection have been identified. They are based on the terminal voltage, fundamental and second harmonic component of differential current. A systemetic way to determine the associated fuzzy membership function is also proposed.

1. 서 론

전력용 변압기는 전력계통 기기 중 매우 중요한 요소이며, 사고가 발생할 경우 그 파급 효과는 상당히 큼으로 변압기 보호는 매우 필수적이라 할 수 있다. 이 변압기 보호용 계전기로는 차동 계전기가 주류를 이루고 있으나 이는 내부사고와 다른 외란의 구분이 명확하지 않은 경우 오동작하는 경우가 발생하여, 근래에 들어와서 고조파, 변압기의 전압, 전류, 자속의 결합방정식, 신경 회로망이나 퍼지 의사 결정, 전력을 이용하는 방법 등이 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 요구된다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 변압기 과도현상의 모의를 통해 내부사고와 여자돌입을 구분할 수 있는 퍼지 룰-베이스를 제시하였고, 퍼지 소속 함수를 이용한 bpa(Basic Probability Assignment) 추출 방법을 제안하였으며, 사례연구를 통해 알고리즘을 검증하였다.

2. 변압기 과도현상 모의

그림 1은 154/22.9 kV Y-Y 3상 변압기의 모의 계통을 보여주고 있다. EMTP를 이용하여 400여가지 데이터를 모의하였다. [3,4,5] 모의 결과로는 변압기 1차측 단자전압과 1, 2차측 전류이며, 이 결과 데이터를 이용하여 퍼지 룰-베이스를 추출하였다. 전압 데이터는 RMS값을 이용하였고, 전류 데이터는 DFT를 이용하여 기본파와 2고조파를 이용하였다. 샘플링은 한 주기 16 샘플로 하였다.

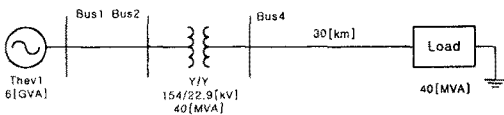


그림 1 모델 계통도

3. Fuzzy Rulebase

일반적으로 변압기 내부사고와 여자돌입의 구분은 차동전류를 이용하고 있으나, 구분이 명확하지 않은 퍼지 구역이 존재한다. 본 논문에서는 외란 발생 후 한 주기 동안의 퍼지 구역의 전압, 전류를 이용하여 퍼지 룰-베이스를 만들었고, 추출된 룰은 외란 발생 후 한 주기 동안 적용되며, 그 이후에는 2고조파 함유량만으로 판단한다.

3.1 1차측 단자전압의 RMS 변화

그림 2에서 보듯이 내부사고의 경우 사고 후 기울기가 (-)쪽에 분포하고, 반대로 Inrush의 경우 변압기 투입 후 기울기가 (+)쪽에 분포하게 된다. 이것을 식으로 표현하면 식(1)과 같이 되고, 이것을 내부사고와 Inrush를 판단할 수 있는 퍼지 룰로 사용하며, 그 boundary는 그림 3과 같다. [6]

$$F_1(n) = \frac{v[n] - v[n-1]}{\Delta T} \quad (1)$$

Rule1) $F_1 > i_m[n] \rightarrow \{1 / Inrush\}$

Rule2) $F_1 < f_M[n] \rightarrow \{1 / Internal Fault\}$

Rule3) $f_M[n] < F_1 < i_m[n] \rightarrow (x / Inrush)$
 $(1-x / Internal Fault)$

여기서,

n : n th sample, ΔT : sample간 시간 간격

$i_m[n]$: Inrush min curve

$f_M[n]$: Internal Fault max curve

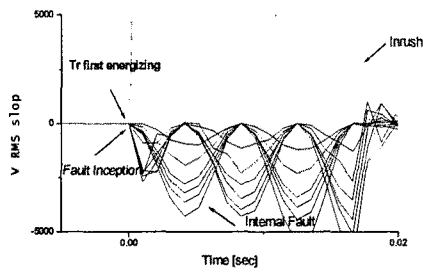


그림 2 1차측 단자전압 RMS 기울기 변화율

Bpa(Basic Probability Assignment)[8]와 관련된 가설의 표현은 중괄호를 이용하며, Rule3에서의 x 값은 4.1절에 나오는 퍼지 소속 함수를 이용하여 산출한다.

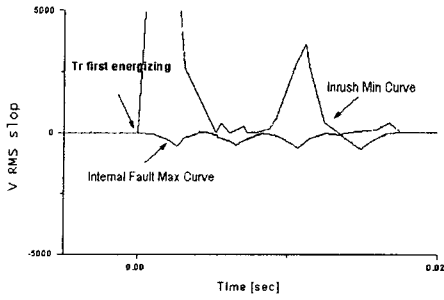


그림 3 3상 RMS 변화율의 boundary

3.2 2고조파 함유량

그림 4는 기존의 차동전류 계전기에서 사용하는 고조파 억제요소인 2고조파 함유량의 분포를 내부사고와 Inrush를 살펴본 그림이며, 여자돌입과 다른 외란을 구분하는 기준이 된다. 외란 발생 초기에 고조파 함유량을 두 가지 모두 큰 값을 갖지만 어느 정도 사이를 두고 분포해 있다는 것을 알 수 있다.

$$F_2(n) = \frac{i_{d2}[n]}{i_{d1}[n]} \cdot 100 \quad (2)$$

- Rule1) $F_2 > i_m[n] \rightarrow \{1 / Inrush\}$
- Rule2) $F_2 < f_m[n] \rightarrow \{1 / Internal Fault\}$
- Rule3) $f_m[n] < F_2 < i_m[n] \rightarrow \{y / Inrush\}$
 $\{1 - y / Internal Fault\}$

여기서,

i_{d1} : 차동전류 기본파

i_{d2} : 차동전류 2고조파

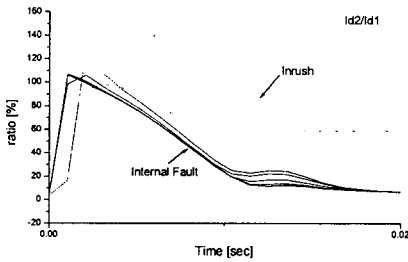


그림 4 2고조파 함유량

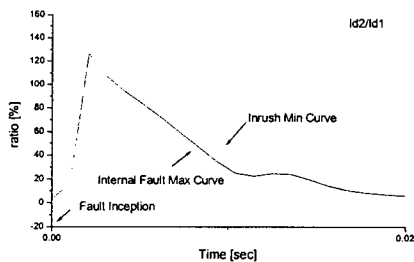


그림 5 2고조파 함유량 boundary

이 2고조파 함유량의 퍼지 룰 베이스는 F_2 값과 정정값으로 4.2절에 소개할 멤버십 함수에 적용되어 bpa값을 구한다.

4. 퍼지 소속 함수와 Bpa 산출

4.1 퍼지 소속 함수

퍼지 룰 베이스 증 전압 RMS 기울기 변화율과 차동전류 2고조파 함유량의 경우 신호의 패턴으로 보아 내부사고와 Inrush가 구분되는 경우이다. 이러한 경우 그림 7와 같이 두가지가 구분되는 대표그림으로 표현할 수 있으며, 그 분포에 따라 구분 가능 지역과 구분이 애매한 지역으로 나눌 수 있다. 이때 구분이 애매한 지역의 경우 그림 6과 같은 소속 함수를 정의한다.

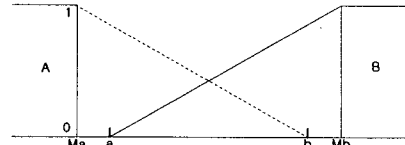


그림 6 A-type 퍼지 소속 함수

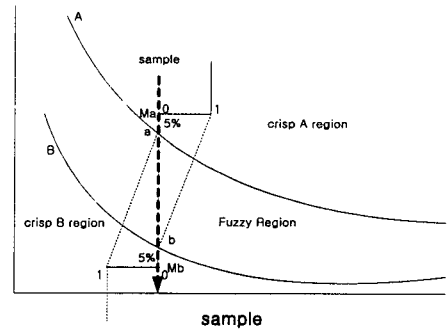


그림 7 퍼지 소속 함수의 적용 예

4.1 Bpa 산출

외란이 구분되는 경계점을 중심으로 5%의 마진을 두고 A곡선에 가까우면 A쪽에 더 많은 bpa값을 할당한다. bpa 값은 0에서 1사이 값으로 정의하며, 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$bpa_A = \frac{1}{(M_a - b)}(x - b), \quad bpa_B = \frac{1}{(M_b - a)}(x - a) \quad (3)$$

여기서,

$$margin = (a - b) \cdot 0.05$$

$$M_a = a + margin, \quad M_b = b + margin$$

x : F_1 과 F_2 의 sample 값

5. 퍼지 추론

각 기준들의 bpa 함수와 실시간 데이터의 조합에서 나온 결과에 대한 bpa 결과 값 $m(F_x), i$ 는 외란의 종류, F_x : 기준) 들을 효과적으로 고려하기 위한 방법으로 MDS(Modified Dempster-Shafer) 결합 룰을 이용하였다.[7]

5.1 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.

를 결합을 하기 전 교집합이 있는 증거들과 없는 증거들을 각각 Grouping을 하고 교집합이 있는 증거들은 기존의 DS 결합 룰인 식 (4)을 이용한다. 그리고 교집합이 없는 증거들의 모입은 식 (5)와 같은 MDS를 이용한다.

$$m_{1,2}(A) = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - K}, A \neq \emptyset \quad (4)$$

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

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

$$m(E_{1-n}) = \frac{m(h_1)/E_1 + m(h_2)/E_2 + \dots + m(h_i)/E_n}{n} \quad (5)$$

여기서, n: 증거의 수, i:가설

6. 사례 연구

제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 사용한 모델 계통은 그림 1에 나타내었고, 내부사고와 여자돌입을 검증하였다. 다음은 내부사고중 5%충간단락 사고와, 여자돌입 전압 투입각 0°의 경우를 나타내었다.

① 충간단락 5% 사고

**** Time: 0.007289 ****

fault : 1.000000 inrush : 0.000000 FI : 0.000000

fault : 1.000000 inrush : 0.000000 FI : 0.000000

*** D-S combination ***

	fault	inrush	FI
fault	1.0000	*	0.0000
inrush	*	0.0000	0.0000
FI	0.0000	0.0000	0.0000

the sum of fault : 1.000000

the sum of inrush: 0.000000

1-K: 1.000000

** Fault : 1.000000

** Inrush: 0.000000

** FI : 0.000000

<<Fault>>

② 여자돌입 0°

**** Time: 0.006248 ****

fault : 0.000000 inrush : 1.000000 FI : 0.000000

fault : 0.057700 inrush : 0.942300 FI : 0.000000

*** D-S combination ***

	fault	inrush	FI
fault	0.0000	*	0.0000
inrush	*	0.9423	0.0000
FI	0.0000	0.0000	0.0000

the sum of fault : 0.000000

the sum of inrush: 0.942300

1-K: 0.942300

** Fault : 0.000000

** Inrush: 1.000000

** FI : 0.000000

<<Inrush>>

위의 사례연구를 통해서 본 알고리즘의 평균 판단시간은 6[ms]였으며, 내부사고인 경우 반주기 이내에서 판단함을 알 수 있었다. 여자도입인 경우도 반주기 이내에서 판단하여 정확히 구분함을 확인하였다.

7. 결 론

본 논문은 EMTP를 이용하여 변압기 과도현상을 모의하였고, 이로부터 전력용 변압기의 내부사고와 여자돌입을 판별할 수 있는 2가지 퍼지 룰-베이스를 제안하였으며, 이 퍼지 룰-베이스로부터 bpa를 산출하는 방법을 결정하였다. 또한 산출한 모든 Bpa의 추론을 위한 결합 방법으로 MDS를 적용하여 변압기 보호 계전 알고리즘을 확립하였으며, 사례연구를 통해 제안된 알고리즘을 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [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, 진보건등, "3상 변압기 보호를 위한 외란 판단기준", 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, 2000.5.20. pp21~24.
- [6] Sang-Tae, Kim et al, "A New Fuzzy Protective Relaying Algorithm for 3-Phase Power Transformer Protection", International Conference of Electrical Engineering, pp 935~939, 2001
- [7] S.J.Lee, S.T.Kim, et.al, "A New Evaluation Methodology for Protection Systems of Primary Distribution Systems Considering Multi-Factors based on Dempster-Shafer's Combination Rule", 대한전기학회 논문지, 48권 11호.
- [8] J. Lewis Blackburn, Protective Relaying Principles and Applications, Second Edition, Marcel Dekker Inc., 1998, Chap9, pp.275-326
- [9] ABB, Protective Relaying Theory and Applications, Marcel Dekker Inc., 1994, pp.145-185
- [10] 김상태, 이승재등, "전압, 전류 변화 추이를 이용한 전력용 변압기 보호계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지 50A 권 4호