

3상 전력용 변압기 내부사고와 여자돌입 구분을 위한 Fuzzy Rulebase와 Bpa 산출 방법

김상태, 이승재, 강상희, 최면송 윤상현, 이태성
 명지대학교 프로그 시스템

Fuzzy Rulebase and Bpa Extracting Method for Distinguishing between Internal Fault and Inrush of 3-Phase Power Transformer

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

Abstract - The four fuzzy criteria to distinguish the internal fault from the inrush for the power transformer protection have been identified. They are based on the wave shape, 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 필수적이라 할 수 있다. 이 변압기 보호용 계전기로는 차동 계전기가 주류를 이루고 있다. 그러나 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 불 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 제안하였다.

2. 변압기 과도현상 모의

그림 1은 154/22.9 kV Y-Y 3상 변압기의 모의 계통을 보여주고 있다. EMTP를 이용하여 40여가지 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.

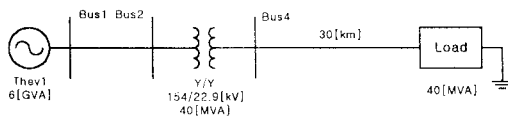


그림 1 모연 계통도

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

변압기가 정상상태일 때 전압 RMS는 일정한 값을 유지하고, Inrush의 경우 변압기 투입 전에는 전압값이 없다. 그러나 외란이 발생하면 이러한 일정한 값이 변화하는데, 내부사고의 경우 유지하던 RMS값보다 작아지고, Inrush의 경우 전압이 투입됨으로 RMS가 상승한다. 이러한 차이를 비교하고자 변압기 1차측 단자 전압 RMS의 기울기 변화율을 롤로서 제시하였다. 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.

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

- Rule1) $F_1 > i_m[n] \rightarrow \{ 1 / Inrush \}$
- Rule2) $F_1 < f_{if}[n] \rightarrow \{ 1 / Internal Fault \}$
- Rule3) $f_{if}[n] < F_1 < i_m[n] \rightarrow \{ x / Inrush \}$
 $\{ 1 - x / Internal Fault \}$

여기서,

n : n th sample, $n-1$: $(n-1)$ th sample

ΔT : sample간 시간 간격

$i_m[n]$: Inrush min curve

$f_{if}[n]$: Internal Fault max curve

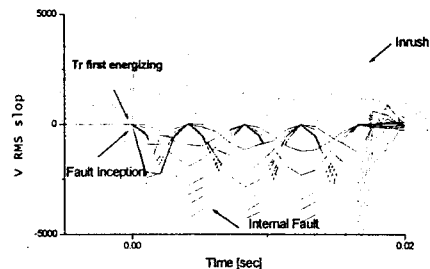


그림 2 변압기 1차측 단자전압 RMS 기울기 변화율

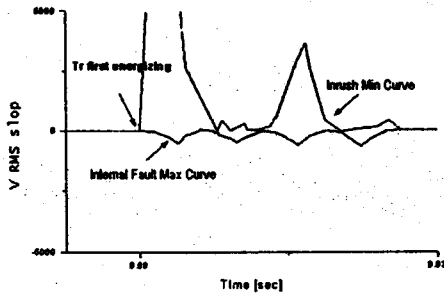


그림 3 전압 RMS 변화율의 boundary

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

3.2 2고조파 함유량

기존의 차동전류 계전기에서 사용하는 고조파 억제 소이다. 이 2고조파 함유량의 분포를 내부사고와 Inrush를 살펴보면 그림 4와 같으며, 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. 이러한 사실을 퍼지 룰 베이스로 다루었다.

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

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

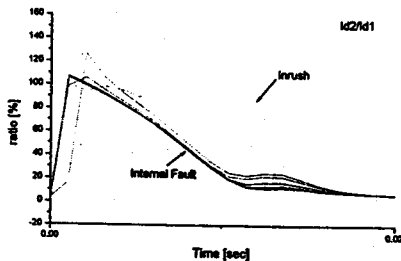


그림 4 2고조파 함유량

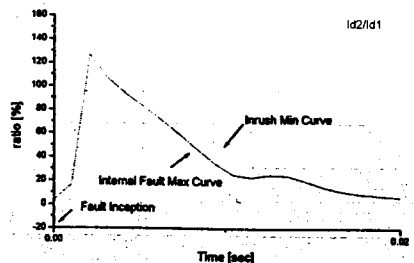


그림 5 2고조파 함유량 boundary

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

3.3 차동전류 파형 [5]

여자돌입전류의 차동전류를 분석해보면 내부사고와는 달리 같은 시간대(약 $\frac{1}{3}$ 주기 : 16 sample중 5 sample)에 3상에서 똑같이 0에 가까운 값을 갖는 특징이 있다. 본 기준으로 여자돌입과 다른 외란을 구분 할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$F_3(n) = \min_{k=0 \dots N-1} \left\{ \max_{m=0 \dots [N/6]} |i_{d-ph}(n-k-m)| \right\} \quad (3)$$

Rule1) $F_3 \leq 1 \rightarrow \{1 / Internal Fault\}$

Rule2) $F_3 \geq 4 \rightarrow \{1 / Inrush\}$

Rule3) $2 \leq F_3 \leq 3 \rightarrow \{z / Inrush\}, \{1 - z / Internal Fault\}$

여기서, i_{d-ph} : 각 상의 차동전류 값

N : 샘플링 수 (=16)

Rule3에 의한 Bpa z은 4.2절의 B-type 퍼지 소속 함수에 의해 결정된다.

3.4 3상 차동전류 변화 [9]

변압기에 내부사고가 발생하면 3상 단락 사고를 제외하고 사고상에서만 차동전류를 검출할 수 있다. 그리고 여자돌입은 3상 동시 투입이 되기 때문에 3상에서 모두 차동전류가 검출이 된다. 이러한 사실을 바탕으로 차동전류가 한상이나 두상에서 발생하면 내부사고, 3상 모두에서 발생하면 내부사고 혹은 Inrush라는 룰을 만들 수 있다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_1(n) = N (|i_{d1-ph}(n)| > H_{thd}) \quad (4)$$

$$F_1(n) = 1 \text{ or } 2 \rightarrow \{1 / Internal Fault\}$$

$$F_1(n) = 3 \rightarrow \{1 / Internal Fault \text{ or } Inrush\}$$

여기서, N : 상의 개수

ph : A, B, C상

H_{thd} : 차동전류 변화 정정치(0.4)

4. 퍼지 소속 함수

4.1 A-Type 퍼지 소속 함수

퍼지 룰 베이스 중 전압 RMS 기울기 변화율과 차동전류 2고조파 함유량의 경우 신호의 패턴으로 보아 내부사고와 Inrush가 구분되는 경우이다. 이러한 경우 그림 4와 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.

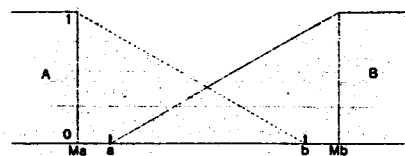


그림 6 A-type 퍼지 소속 함수

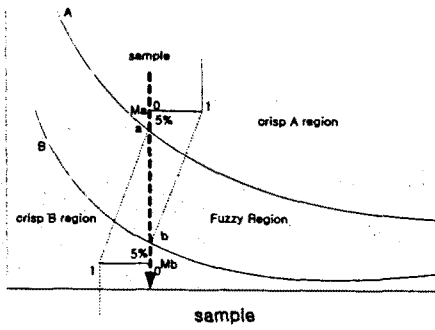


그림 7 퍼지 소속 함수의 적용 예

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.

$$bpa_A = \frac{1}{(M_a - b)}(x - b), \quad bpa_B = \frac{1}{(M_b - a)}(x - a) \quad (5)$$

여기서,

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

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

x: F_{1-3} , F_{2-3} sample 값

4.2 B-Type 퍼지 소속 함수

차동전류의 파형의 경우 다음과 같은 퍼지 소속함수를 정의한다. Inrush의 경우 같은 시간대에서 3상 모두 0에 가까운 값을 나타내는데 그 시간이 한 주기 16 샘플 중 5샘플동안 지속된다. [5] 이것을 퍼지 소속함수로 만들면 그림 8과 같다. 같은 값이 2sample 이하면 내부사고이며, 4샘플이상이면 Inrush라 할 수 있다. bpa는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

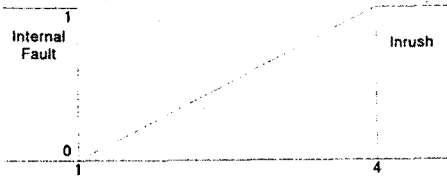


그림 8 B-type 퍼지 소속 함수

$$bpa_B = \frac{1}{3}(x - 1) \quad (6)$$

여기서, x: F_3

4. 흐름도

그림 9는 사고 판단을 위한 흐름도를 보여주고 있다. 이 흐름도는 데이터 입력부와 퍼지 입력값 산출부, bpa 산출부, bpa 결합부, 의사 결정부로 이루어졌으며, 퍼지 룰에 의한 bpa 결합은 수정 Dempster-Shafer 결합법을 이용하였다.

5. 결론

본 논문은 EMTP를 이용하여 변압기 과도현상을 모의하였고, 이로부터 전력용 변압기의 내부사고와 여자돌입을 판별할 수 있는 4가지 퍼지 룰-베이스를 제안하였다. 그리고 이 퍼지 룰-베이스로부터 bpa를 산출하는

방법을 결정하였다. 향후 과제로 산출한 모든 Bpa의 추론을 위한 결합 방법을 이용하여 변압기 보호 계전 알고리즘을 확립할 것이다.

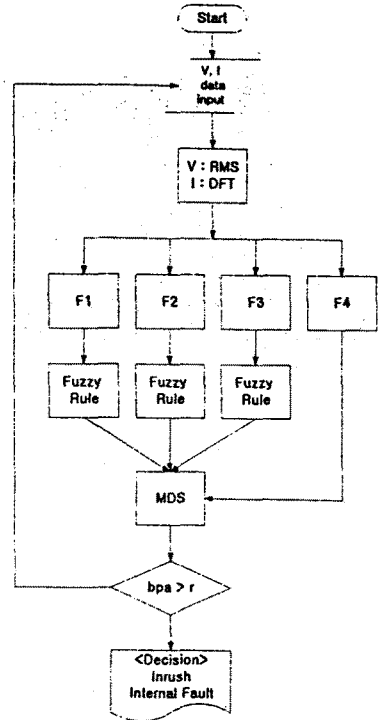


그림 9 흐름도

[참고 문헌]

- [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. 1., 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] 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] 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.
- [9] 김상태, 이승재등, "전압, 전류 변화 주기를 이용한 전력용 변압기 보호계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지 50A권 4호