

Dempster-Shafer 룰 결합을 이용한 변압기 보호계전 알고리즘

강대훈 . 이승재* . 강상희* . 김상태* . 권태원*
 명지대학교 전력시스템 센터*

김일동** . 장병태** . 임성일**
 한전 전력 연구원**

Transformer Protective Relaying Algorithm Using A Dempster-Shafer's Rule of Combination

D.H.Kang S.J.Lee S.H.Kang S.T.Kim T.W.Kwon
 Myongji University

I.D.Kim B.T.Jang S.I.Lim
 KEPRI

Abstract - An intelligent power transformer protective relaying algorithm based on fuzzy decision-making is proposed. To distinguish external faults with CT saturation, overexcitation and inrush conditions from internal faults, a newly designed fuzzy-rule base is used. The Dempster-Shafer's rule of combination is used for fuzzy inference. A series of the S/W and H/W tests show the proposed protection algorithm has practically sufficient sensitivity and selectivity.

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

$$f_3(n) = \frac{I_{a5}(n)}{I_{a1}(n)} \quad (3)$$

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

$f_x(n)$: 입력변수

$I_{a1}(n)$: 차동전류 기본파 크기

$I_{a2}(n)$: 차동전류 2고조파 크기

$I_{a5}(n)$: 차동전류 5고조파 크기

I_1 : 변압기 1차측 CT 출력전류의 기본파 성분

I_2 : 변압기 2차측 CT 출력전류의 기본파 성분

$\Delta\theta$: I_1, I_2 의 위상각

식(1)은 차동전류의 기본파의 크기, 식(2)은 차동전류의 기본파에 대한 제 2고조파의 비율, 식(3)은 차동전류의 기본파에 대한 제 5고조파의 비율을 나타낸 입력 변수이며, 식(4)는 CT포화를 초래하는 외부사고를 위한 것이다.

일반적으로 사고후 시간의 경과에 따라 입력 변수의 값이 변화한다는 사실에 입각하여 외란 직후 9 샘플(주기당 16샘플)부터 샘플별로 각각 따로 8개의 룰 그룹을 만들었다. 이는 초기과도현상이 심하여 어느 정도 안정을 찾는 반주기 이후부터 판단이 가능했기 때문이다. 우선 EMTP로부터 얻은 결과 값에 CT비 오차를 보상에 주어, 차동전류 기본파 크기 0.176[A]를 외란 판정의 기준 값으로 정하였다. 모의 계통에서 외란 발생 시 기준값까지 도달하는 시점은 최대 2 샘플 후이다. 이 기준값을 3번 연속 넘으면 외란으로 간주하고 그때부터 과도현상이 아주 심한 3 샘플을 버리고 9번째 값부터 룰을 만드는 데 사용하였다. 외란 발생 후 과도 현상이 약 한주기 동안 지속되기 때문에 그 불확실성에 대처하기 위해 룰들을 샘플별로 만들어 적용하여 빠르게는 외란 발생 후 1/2주기에서 판단을 하고 늦어도 1주기 내에서 판단할 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘은 1주기 이후에서는 1주기룰이 지속적으로 적용 된다.

변압기의 과도현상 분석 결과를 이용하여 변압기 내부 사고를 판단할 수 있는 퍼지 멤버십 함수를 만들 때, 그림 1과 같은 퍼지 셋팅을 이용한다.

1. 서 론

기존에 사용되고 있는 보호계전기들은 동작 레벨이 고정되어 있어 피보호 설비의 다양한 상태 변동 및 계통 조건의 변화에 민감하게 반응하지 못하여 전력계통에 고장 발생시 보호계전기가 동작하지 않아 설비 피해가 확대되거나, 동작하지 말아야 할 현상에 보호 계전기가 오동작 되어 불필요한 정전 피해를 일으키는 경우가 있어 전력 공급 신뢰도 유지 및 설비 안전 확보에 많은 어려움을 겪고 있다.

변압기보호에서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여자 돌입 전류는 보호계전기내에 지연 요소 함유나 제 2고조파 억제 기능으로, 과여자는 제 5고조파 억제 기능으로, 변류기 포화나 변류기를 포함한 변압기 1, 2차측 특성차 등은 비율 차동 요소로 대응하였다. 그러나 변압기의 경제적 포화밀도의 감소로 여자시 2고조파양이 감소하고, 심한 과여자시도 오히려 5고조파양이 감소하며 또한 고압화 및 지중화에 의한 계통의 정전용량 증대 등으로 인한 사고시 저차 고조파의 증가와 같은 계통 조건의 복잡화로 기존의 억제 기능을 포함한 비율 차동 계전 방식으로는 효과적인 변압기 보호가 어려워지고 있다. [1]

본 논문에서는 EMTP를 이용하여 변압기의 여러 가지 과도현상을 모의하여 변압기 1, 2차측 전류의 차동전류를 이용하여 고조파 분석을 실행한 후 이 결과를 가지고 퍼지 룰 베이스를 구성하였다. 구성된 룰들의 결합 방법으로는 복합가설을 갖는 문제의 진단에 적합하고 사람 판단에 가장 가까운 Dempster-Shafer 룰 결합을 이용하여 추론하였다. 본 논문에서 변압기 보호계전 알고리즘의 실시간 구현을 검증하기 위하여 많은 연산을 빠른 속도로 처리하는 TMS320C31 마이크로프로세서를 이용하여 하드웨어 테스트를 하였다.

2 퍼지 룰-베이스

변압기 과도 특성 분석 결과로부터 다음과 같은 입력 변수를 구성하였다. 이 입력 변수는 퍼지 셋팅의 가로축에 해당하는 값이다.

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

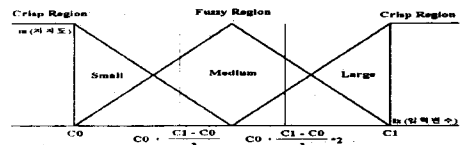


그림 1 퍼지 셋팅

입력 변수에 해당하는 값들을 그림 1과 같은 퍼지 셋팅의 가로축에 도시하여, 예를 들어 완전 고장인 구간과 완전히 정상인 구간을 나누게 된다. 즉 명쾌한(Crisp) 영역을 구분하고, 그사이의 애매한 부분을 퍼지 영역으로 설정한다. 이 퍼지 영역을 3등분하고 삼각형법을 적용한 퍼지 셋팅으로 퍼지 멤버십 함수를 만들고 각 구간을 Small, Medium, Large라하며 이에 따라 룰을 만들게 된다. 만약 명쾌한(Crisp) 영역이 나오지 않으면 룰로써 취급하지 않는다.

퍼지 영역의 3등분한 각 구간에서 식 (4)과 같이 해당 구간 외란의 총 경우의 수에 대한 각 특정 외란의 수(내부사고, 여자돌입, 과여자, 외부사고)의 비에 시뮬레이션 에러 10%를 고려하여 0.9를 곱하여 1차 초기 지지도가 된다.

$$1차\ 초기\ 지지도(m) = \frac{\text{구간에서의 특정 외란의 수}}{\text{각 해당 구간의 외란의 총 수}} \times 0.9 \quad (4)$$

이 초기 지지도가 α (예:0.6)값을 넘으면 단순가설로 처리하고, β (예:0.2)이하이면 단순가설로 취급하지 않고 Dempster-Shafer 를 결합의 조건에 따라 전체 셋(H)에 배정시킨다. 또 β 값은 넘으나 α 값이 되지 않는 경우 서로의 차이가 β 이하이고 그 합이 α 값을 넘으면 복합가설로 취급한다. 이렇게 구해진 것을 2차 초기 지지도라 한다. 외란이 발생하면 입력 변수에 따라 퍼지화된 정보가 생긴다. 이 정보를 2차 초기 지지도와 결합하여 새로운 지지도들을 산출하게 된다. 각 룰에 따른 지지도 값으로 상태(내부고장, 여자돌입, 과여자, 외부사고)판단을 하기 위하여 각 룰을 결합하는 방법이 필요하며 본 연구에서는 진단의 문제에 적합하고, 복합가설의 추론이 가능하며 사람의 판단에 가장 가깝다는 Dempster-Shafer 를 결합을 사용하여 추론하며 이로부터 얻은 최종 지지도로 최종 상태판단을 하게 된다.

최종 상태 판단은 가장 큰 지지도가 두 번째 큰 지지도의 2배 이상이 되고, 해당 샘플에서의 판단 기준값을 넘어야 최종 판단을 하게 된다. 판단 기준값이란 외란이 일어난 시점에 가까운 룰은 판단시 어느 정도 확실치 않으면 판단하지 못하도록 설정한 기준 값이다. 1주기 이상에서는 최종 판단이 되지 않을 경우 10주기까지 보류 후 제일 높은 값을 최종 판단으로 한다.

3 Dempster-Shafer 를 결합

각 룰에 해당되는 지지도들은 사고판정부, 즉 Dempster-Shafer 룰 결합의 추론부에서 상태(내부사고, 여자돌입, 과여자, 외부사고)판단에 사용된다. 이때의 룰 결합은 식(5)를 사용한다. [2]

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

$$K = \sum_{B|C=\emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C), m_{1,2}(\emptyset) = (5)$$

룰 결합의 결과 각각의 경우에 대한 지지도 값들이 나오게 되는데, 최종 판결시 다음과 같은 조건에 의해 판정을 내리게 된다.

- 최고지지도 > 기준값 AND 최고 지지도 > 그 다음 지지도 × 2
→ 결정
- 최고지지도 < 그 다음 지지도 × 2 OR 최고지지도 < 판단기준
→ 보류

4 사례 연구

변압기 내부 사고 검출을 위한 알고리즘의 성능 검증을 위하여 아래와 같은 모델 계통에서의 데이터를 이용하여 검증하였다.

4.1 모델 계통도

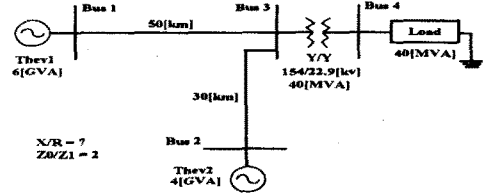


그림 2 모델 계통도

본 모델 계통에서 획득한 과도 전류 신호를 이용하여 알고리즘을 수행하였으며 주기당 16번 샘플 하였다.

4.2 내부 사고가 아닌 경우

표 1의 결과들은 그림 2 모델 계통에서 변압기 2차측의 모선에서 사고를 모의한 변압기 외부사고, 여자돌입, 과여자의 결과를 보여준 것이다. 여자돌입 90°인 경우 지지도가 나타나지 않았는데, 이는 전압위상 90°에서 변압기가 투입되는 경우 돌입 현상이 없어 차동전류의 기본파의 크기가 기준치(예:0.176(A))를 넘지 않아 사고 판정부로 들어가지 않았음을 나타낸다. 총 152가지 모두 정상적으로 판정되었다. 샘플 번호는 외란 발생 후 판단까지의 샘플 수이다. 판단시간은 최대 17 샘플(약 1주기)이었다.

표 1 내부사고가 아닌 경우의 지지도

외란종류	판단시간 (샘플)	지 지 도				최종판단
		내부고장	여자돌입	과여자	외부사 고	
외부 지락사고 0°	12	0.000	0.000	0.000	1.000	외부사고
외부 지락사고 90°	13	0.000	0.133	0.038	0.829	외부사고
여자돌입 0°	16	0.016	0.980	0.004	0.000	여자돌입
여자돌입 90°	---	---	---	---	---	---
과여자 130%	12	0.000	0.000	1.000	0.000	과여자

4.3 내부 사고인 경우

표 2의 결과들은 그림 2 모델 계통에서 변압기 총간 단락사고 2%, 10%, 전압 위상각 0° 및 90°를 테스트한 결과이며 모든 경우에서 내부사고로 판단한다. 동작시간은 최대 13샘플(약 ¾주기)이었다.

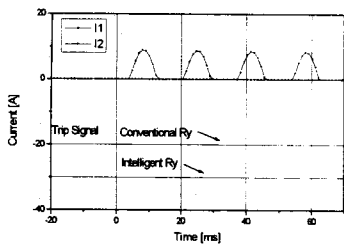
표 2 내부사고인 경우의 지지도

외란종류	판단시간 (샘플)	지 지 도				최종판단
		내부고 장	여자들 입	과여자	외부사 고	
지락 사고 0°	11	1.000	0.000	0.000	0.000	내부사고
상간 단락 0°	11	1.000	0.000	0.000	0.000	내부사고
충간단락 2% 0°	13	1.000	0.000	0.000	0.000	내부사고
충간단락 2% 90°	11	1.000	0.000	0.000	0.000	내부사고
충간단락 10% 0°	9	1.000	0.000	0.000	0.000	내부사고
충간단락 10% 90°	11	1.000	0.000	0.000	0.000	내부사고

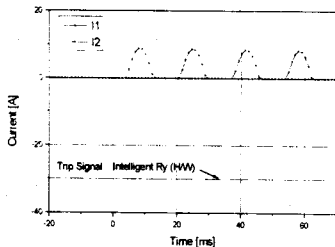
4.4 기존 계전 알고리즘과의 비교 및 하드웨어 테스트 결과

기존의 차동전류 계전 알고리즘은 일반적인 비율차동계전 방식으로, 15%이상의 2고조파가 함유되어 있으면 고장이 아닌 것으로 판별하게 된다. 억제요소와 동작요소의 기율기는 0.167로 설정되어 있다. 두 번 연속 내부사고로 판단될 경우 최종적으로 차단신호를 출력하게 된다

변압기 보호용 지능형 계전 알고리즘의 H/W 검증을 위하여 DSP 전용 칩을 사용하는 테스트시스템을 구축하였다. H/W로 테스트하기 위하여 먼저 EMTP에서 사고 파형의 디지털 값을 얻은 후 D/A 변환기인 PCL727을 통과하여 아날로그 신호를 발생시킨다. 그 아날로그 신호는 노이즈 제거를 위해 필터를 거치며, 필터를 거친 아날로그 신호는 PC31보드의 A/D변환기에서 샘플링된다.



(a) S/W테스트

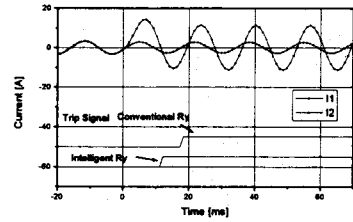


(b) H/W테스트

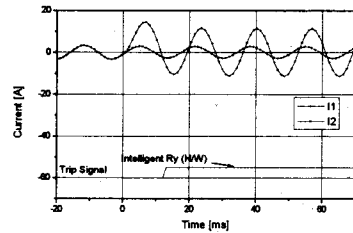
그림3 여자들입 0°

그림 3은 여자들입 0° 투입시 지능형 계전기와 기

존의 차동전류 계전 알고리즘과 하드웨어 테스트결과를 비교한것이다. 파형과 차단신호를 같이 도시하였다. 모든 결과가 오동작하지 않았다.



(a) S/W 테스트



(b) H/W 테스트

그림 4 충간단락 2% 0° 사고

그림 4는 내부사고중 충간단락 2% 0° 사고를 파형과 차단신호를 같이 도시하였고지능형 계전 알고리즘이 기존의 차동계전 알고리즘보다 사고 판단 속도가 빠르다는 것을 소프트웨어나 하드웨어 테스트에서 확인하였다.

5. 결 론

현재의 비율 차동 계전기는 기존의 많은 문제점을 보완한 것이지만, 변압기 효율의 증대, 고압화 및 지중화에 의한 계통의 정전용량의 증대 등과 같은 계통 조건의 복잡화로 기존의 억제 기능을 포함한 계전 방식으로 효과적인 변압기 보호가 어려워지고 있다. 따라서 인공 지능형 계전기와 그 알고리즘의 개발이 불가피하게 되었다. 본 연구에서는 EMTP를 이용하여 변압기의 과도 특성을 모의하였고, 그 결과로 1, 2차측의 차동전류 기본파와 차동 전류의 고조파 분석을 하였다. 그 결과를 토대로 변압기 내부 사고 검출을 위한 퍼지 룰-베이스를 구성하였고, Dempster-Shafer 룰 결합을 이용하여 추론하였다. 본 알고리즘은 내부사고시 동작속도는 최대 13샘플(약 1/3주기)이 걸렸고, 결과값이 신뢰도가 있음을 확인하였고 제안된 알고리즘을 H/W로 테스트하여 양호한 결과를 얻었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", ABB Power T&D Company Inc., 1994, pp. 145 - 165.
- [2] George J. Klir, Tina A. Folger, "Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information", Prentice Hall p114-p118