

DC-offset 영향을 최소화한 변압기보호 디지털 비율차동 계전알고리즘 구현

권영진 강상희 이승재
명지대학교 전기공학과

정성교
젤파워

A Digital Current Differential Transformer Protection Algorithm Minimizing the Effect of DC-offset

Young-Jin Kwon, Sang-Hee Kang, Seeng-Jae Lee
Myongji University

Sung-Kyo Jung
Xelpower

Abstract - This paper presents a digital current differential protection algorithm for a transformer in power system. This algorithm uses an FIR filter to improve the performance of the relay. This paper presents a practical method setting the operating slope of the relay and reduce ct mismatch. A series of EMTP simulation results have shown effectiveness of the algorithm under various type of transformers and conditions.

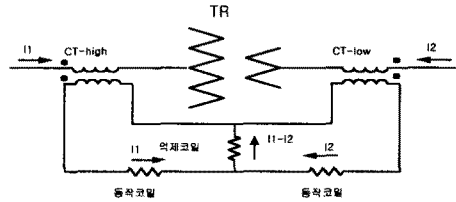


그림 1. 비율차동 원리

1. 서 론

변압기 보호 계전 방식으로는 차동 계전방식과 이것을 보완한 비율차동 계전 방식이 가장 널리 쓰인다. 본 논문에서는 전통적인 비율차동 계전방식을 디지털 형태로 구현하였으며 비율차동 요소와 고조파 억제 요소를 사용하였다[1]. 전력계통의 사고 발생시 직류 오프셋이 신호에 포함되게 되면 과도시에 정확한 페이서 추출이 어렵게 되어 사고판단 시간이 지연된다.[2] 직류오프셋 성분은 전류신호에 존재함으로 전류신호에만 의존하여 계전알고리즘을 수행하는 비율차동 계전방식은 직류오프셋이 사고 신호에 존재하게 되면 사고 판단 시간이 지연된다. 본 논문에서는 FIR 필터로 변압기 사고시 발생하는 직류오프셋을 제거하여 알고리즘의 판단 시간을 단축하였다. 또한 변압기 결선 및 CT 결선에 따른 위상 및 크기 보상과 비율차동 계전기의 성능에 주요한 영향을 미치는 동작 특성 곡선의 설정 방법 및 CT mismatch의 영향을 최소화하는 방법을 구현하였다.

변압기 및 사고 모의는 EMTP (Electromagnetic Transients Program)를 사용하였으며 변압기 보호 계전 방식 구현시 고려해야 할 내부사고 및 외부사고와 여자돌입, 과여자상태에서 알고리즘을 수행한 결과 모든 경우에 있어서 신속하고 정확한 판단이 가능함을 검증할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 CT mismatch의 보상

그림1과 같은 비율차동 계전방식에서 변압기 1,2차측에 적정 CT비를 고려하여 전류를 취득하여도 1,2차 전류가 완전히 일치 하지 않음으로 동작 특성곡선 기울기의 최소 동작전류값과 기울기 설정에 영향을 미친다. 따라서 CT mismatch를 완벽하게 보상해 줄 필요가 있다. 아날로그형 계전기는 계전기에 설치된 단계별 Tap을 이용하여 조정 하였으나 이 경우 완벽한 보상이 이루어지지 않는 반면 디지털형은 수치적 연산이 가능하므로 CT mismatch를 완벽하게 보상해줄 수 있다.

변압기 용량과 1,2차 정격 전압값, CT비를 이용하여 다음과 같이 보상한다.

$$I_1 = (\text{변압기 1차측 CT 통과전류}) \times K_2$$

$$I_2 = (\text{변압기 2차측 CT 통과전류}) \times K_1$$

$$K_1 = \frac{MVA}{\sqrt{3} V_1 \times 1\text{차측 CT 비}}$$

$$K_2 = \frac{MVA}{\sqrt{3} V_2 \times 2\text{차측 CT 비}}$$

여기서,

MVA: 변압기 정격 용량

V₁: 1차측 정격 전압, V₂: 2차측 정격 전압

K₁: 1차측 전류 보정계수 K₂: 2차측 전류 보정계수

I₁, I₂: 알고리즘 연산에 사용되는 전류값

위의 CT mismatch를 완전히 보상한 전류 I₁, I₂를 알고리즘에 사용한다. 정상상태에서는 I₁과 I₂의 백터합은 거의 0에 가까운 값이므로 동작특성 곡선상의 최소 동작전류 설정값과 기울기를 낮게 설정하여 계전기의 감도를 높여 사고판단 속도를 향상 시킬수 있다.

2.2 동작영역과 억제영역의 결정

동작영역과 억제 영역을 구분하는 기울기의 선정은 비율차동 계전 방식의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 디지털형 계전기에서는 이 비율차동 특성을 얻기 위하여 샘플링한 전류 데이터로 백터량과 스칼라량을 연산하여 결정한다. 동작특성 곡선 정정시 과거에는 O.L.T.C (On Load Tap Changer)에 의한 오차, CT 오차와 포화, CT mismatch 및 정정에 대한 허용 오차 등을 종합적으로 고려하여 그림2의 Slope1과 같이 단일 기울기로 정정하였다. 그러나 이렇게 할 경우 계전기 동작 속도 및 민감도가 떨어지게 된다.

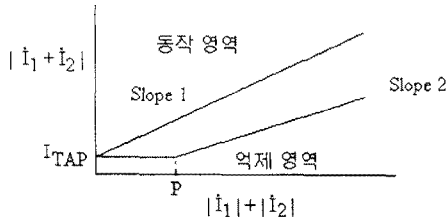


그림 2. 비율차동 동작특성 곡선

따라서 본 논문에서는 Slope2 와 같이 2단계의 기울기를 적용하였다. 현재 계통에서 사용되고 있는 변압기의 O.L.T.C는 전압의 $\pm 10\%$ 내외에서 조정하며, O.L.T.C에 의한 오차와 CT 오차 $\pm 10\%$ 를 반영하여 최소 동작전류 값인 I_{TAP} 값을 설정한다. O.L.T.C를 최대 10% 조정했을 때 정격전류는 11.1% 변화한다. CT 오차는 오차가 최대가 될 수 있도록 1,2차 양측에 -10% , $+10\%$ 를 반영한다. 따라서 최소 동작 전류점인 I_{TAP} 값은 식 (1)과 같이 설정한다.

$$I_{TAP} = |(I_{1r} \times 0.9) - (I_{2r} \times 1.11) \times 1.1| \quad (1)$$

여기서, I_{1r} : 1차 정격전류 I_{2r} : 2차 정격전류

점 P는 정격전류의 스칼라 합이 되는 지점으로 위에서 고려한 오차요인을 반영하여 식(2)와 같이 설정한다.

$$P = |(I_{1r} \times 0.9)| + |(I_{2r} \times 1.11) \times 1.1| \quad (2)$$

원점에서 P점까지의 기울기는 0이다. P점 이후 대전류 영역 사고시에서는 스칼라 값을 P점의 20배 크기인 지점을 기준으로 기울기를 결정한다. 이는 CT의 예러가 정격전류의 20배에서 10% 이내인 점을 고려한 것이다. P점 이후의 곡선의 기울기는 식 (3)과 같이 설정한다.

$$\frac{20 \times I_{TAP} - I_{TAP}}{20 \times P - P} \quad (3)$$

식(3)의 값에 대전류 영역에서 CT 포화에 대한 오차를 고려하여 10%의 여유를 준다.

2.3 고조파 억제 요소

변압기의 현상 중에서 여자돌입과 과여자등 사고가 아닌 상태에서 차 전류가 발생하여 벡터의 궤적이 동작 영역으로 들어가 계전기가 오동작하는 것을 방지하기 위하여 고조파 억제 요소를 사용한다. 여자돌입시는 2고조파 억제 요소, 과여자시에는 5고조파 억제 요소를 사용한다. 본 논문에서는 페이서 추출 방법으로 한주기 이산 푸리에 변환을 사용한다. 이 경우 한주기 데이터 윈도우를 사용함에 따라 정상상태에서 사고발생후 과도 상태로 데이터 윈도우가 걸리게 되면 실제 신호에는 고조파가 없음에도 불구하고 페이서 추출시 고조파 성분이 추출됨으로 억제 요소로 작용하여 계전기 판단시간이 지연된다.

2.4 직류옴셋 제거

직류옴셋을 제거하기 위하여 사용한 필터는 임의의 샘플 데이터 수로 구성되는 윈도우 내의 직류 옴셋 성분을 상수로 가정된 것으로, 일정 윈도우 내의 입력 파형을 식(4)로 표현된다. 윈도우가 옮겨 감에 따라 옴셋의 크기 c 는 변하게 된다. 이때 직류옴셋 성분은 식(5)에 의해 제거 된다.

$$x_k = \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + c \quad (4)$$

여기서,

c : 상수, N : 주기당 샘플링 수, n : 고조파 차수

$$y_k = x_k - x_{k-m} \quad (5)$$

여기서, m : 필터 윈도우 크기

식(4)의 파형을 식(5)로 표현되는 필터를 통과 시키면 그 출력은 아래 식 (6)과 같이 된다.

$$y_k = \sum_{n=1}^{\infty} X_n a_N \sin\left(\frac{2\pi nk}{N} + \phi_n\right) \quad (6)$$

여기서,

$$a_N = \sqrt{E_N^2 + F_N^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{F_N}{E_N}\right)$$

$$E_N = 1 - \cos\left(\frac{2\pi nM}{N}\right), \quad F_N = \sin\left(\frac{2\pi nM}{N}\right)$$

직류옴셋을 제거하는 FIR 필터를 거치게 되면 크기와 위상이 바뀌게 되는데 FIR 필터의 특성상 위상은 선형 관계를 유지함으로 크기에 대한 보상만 한 후 알고리즘에 적용한다.

2.5 변압기 및 CT 결선에 따른 위상 보상

변압기 및 CT를 조합하여 사용될 수 있는 결선의 종류를 다음 표1에 정리하였다. 변압기 결선에 Δ 결선을 포함하고 있을 때 CT를 Y-Y 결선으로 접속하게 되면 1,2차 측 사이에 30° 의 뒤지거나 앞서는 위상차가 발생하게 되고 CT에 Δ 결선이 포함되어 있을 경우 취득 전류의 크기는 CT비 보다 $\sqrt{3}$ 배 커지게 된다. 위상은 식(7)과 같이 보정하며 크기의 경우는 $\sqrt{3}$ 으로 나누어 보정을 한다.

$$I = Ie^{j\theta} \quad (\theta = \pm 30^\circ) \quad (7)$$

표 1. 변압기와 CT 결선 조합

구분	변압기 결선	승격전압 변압기 상결선 순서	CT 결선	승격전압 CT 결선 순서	1차 기준 2차측 위상차	위상 보정	CT 통과후 전류 크기	크기 보정
1	Y-Y		Y-Y		동상	보정 없음	1,2 차측 변화없음	보정 없음
2	Y- Δ	ABC	Y-Y		-30	2차측 +30	1,2 차측 변화없음	보정 없음
3	Y- Δ	ACB	Y-Y		+30	1차측 +30	1,2 차측 변화없음	보정 없음
4	Δ -Y	ACB	Y-Y		-30	2차측 +30	1,2 차측 변화없음	보정 없음
5	Δ -Y	ABC	Y-Y		+30	1차측 +30	1,2 차측 변화없음	보정 없음
6	Y-Y		Δ - Δ		1차: ABC 2차: ABC	동상	보정 없음	1,2 차측 변화없음 (1,2차) $\sqrt{3}$
7	Y-Y		Δ - Δ		1차: ACB 2차: ACB	동상	보정 없음	1,2 차측 변화없음 (1,2차) $\sqrt{3}$
8	Y- Δ	ABC	Δ -Y	ABC	동상	보정 없음	1차측 $\sqrt{3}$ 배커짐	1차 $\sqrt{3}$
9	Y- Δ	ACB	Δ -Y	ACB	동상	보정 없음	1차측 $\sqrt{3}$ 배커짐	1차 $\sqrt{3}$
10	Δ - Δ	1차: ABC 2차: ABC	Y-Y		동상	보정 없음	1,2 차측 변화없음	보정 없음
11	Δ - Δ	1차: ACB 2차: ACB	Y-Y		동상	보정 없음	1,2 차측 변화없음	보정 없음
12	Δ -Y	ACB	Y- Δ	ACB	동상	보정 없음	2차측 $\sqrt{3}$ 배커짐	2차 $\sqrt{3}$
13	Δ -Y	ABC	Y- Δ	ABC	동상	보정 없음	2차측 $\sqrt{3}$ 배커짐	2차 $\sqrt{3}$

2.6 계전 알고리즘의 흐름

보호 대상 변압기에 대한 정보를 초기화 단계에서 입력 하던 알고리즘은 자동으로 2.1절과 2.2절에서 설명한 방법에 따라 자동으로 CT mismatch 보상계수 및 계전기 동작 특성 곡선을 설정한다. 주기당 32 샘플링을 하였으며 중첩방지를 위한 Butterworth 2차 저역통과 필터를 사용하였다. 사고판단은 Fault Counter를 두어 연속 카운팅 횟수가 설정값을 넘었을 때 고장 판단을 하도록 했다. 사고 판단은 각 상별로 독립적으로 수행된다.

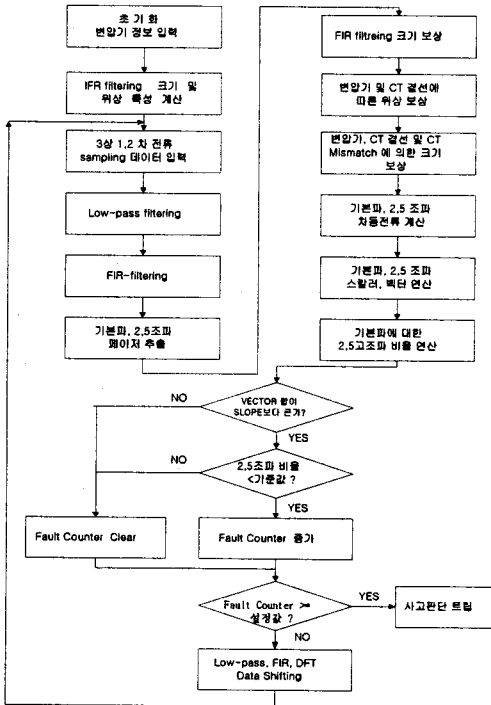


그림 3. 알고리즘 흐름도

2.7 사례연구

적용 모델계통은 아래 그림4와 같으며 EMTF를 이용하여 표1의 각 경우에 해당하는 변압기와 CT 결선을 모의 하였다. 변압기는 3상 벙크로 구성하였으며 변압기 내부사고인 권선지락과 단락 및 외부사고, 여자돌입의 경우를 사고시 전압 위상각, 사고 권선 비율등을 달리하여 모의하였다.

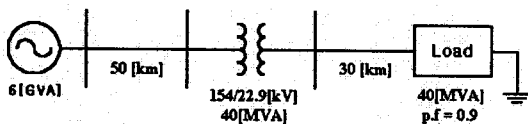


그림 4. 적용 대상 계통

2.7.1 직류음성 제거 효과

그림5에서와 같이 FIR 필터를 거치게 되면 과도상태에서 직류음성 성분이 제거되어 보다 정확한 패이서를 추출할수 있다. 또한 푸리에 변환시 한주기 데이터 원도

우를 사용함에 따라 과도상태에서 기본파에 대한 고조파 함유량이 커져 억제 요소로 작용하는 현상도 줄어든다.

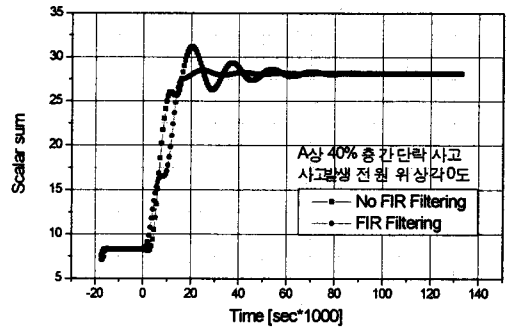


그림 5. 스칼라 합(억제량)의 변화

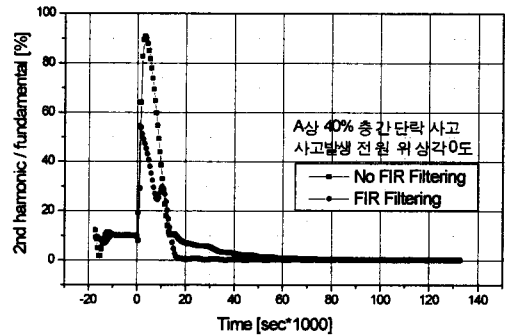


그림 6. 기본파에 대한 2고조파 함유량의 변화

2.7.2 비율차동 알고리즘 동작

내부사고는 A상 권선 단락 10%, 40%이며, 외부사고는 변압기 2차측 변압기 근단에 1선 지락이고 여자돌입은 무부하시이며 각각의 경우 사고발생 및 전원 투입은 직류음성의 영향이 가장 커지는 전원 위상각 0도 일때이다. CT mismatch의 보상으로 정상상태일 때 벡터합은 거의 0에 가까운 값을 가지며 대전류 영역에서 동작 특성 곡선의 기울기도 낮게 설정할수 있다.

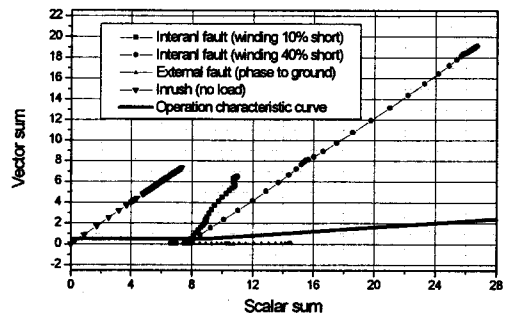


그림 7. 동작량과 억제량의 변화

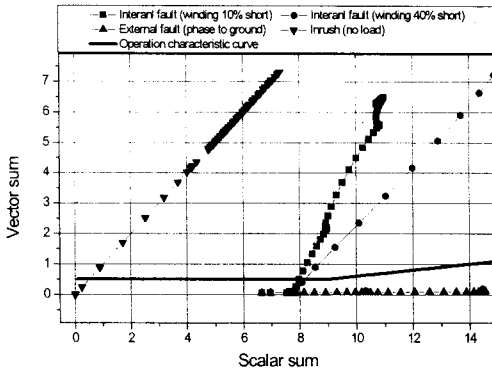


그림 8 동작량과 억제량의 변화

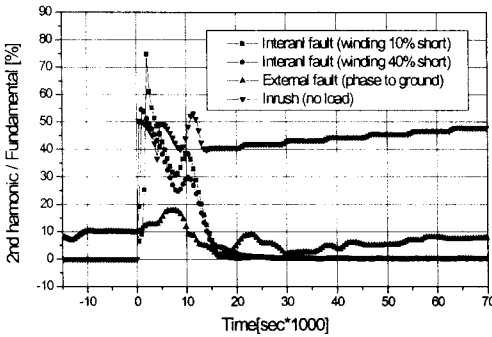


그림 9. 기본파에 대한 2고조파 함유량의 변화

그림7은 동작특성 곡선상에서 동작량과 억제량의 변화 추이이며 그림8은 그림7의 확대도이다. 그림9은 2고조파 억제요소값의 시간에 따른 변화이다. 내부사고시 그림8에서 벡터의 궤적이 동작영역 안으로 들어가더라도 과도시에 한주기 데이터 윈도우의 사용에 따른 2고조파 억제요소값이 설정값 이상이므로 계전 알고리즘은 사고를 판단하지 못하고 2고조파 억제 요소 설정값인 35%이하로 떨어졌을 때 사고로 판단하게 된다. 그림6에서 비교한 것처럼 FIR 필터를 사용하지 않았을시에는 억제요소값이 작아지는데 시간이 더 소요됨으로 그만큼 사고 판단이 느려지게 된다. 여자돌입시는 큰 차동전류가 발생하여 그림8에서 벡터의 궤적이 동작영역 안으로 들어가게 되나 그림9에서와 같이 2고조파 억제요소 값이 설정값을 계속 넘게 되어 사고로 인식되지 않는다. 외부사고시는 큰 전류가 발생하나 이 전류는 변압기를 통과하는 전류이고 그림8과 같이 스칼라 합은 커지나 벡터합은 정상상태와 같은 수준을 유지하게 되고 그림9에서 2고조파 억제요소 값 역시 설정값보다 낮음으로 사고로 판단되지 않는다.

표2에서 보는 바와 같이 FIR 필터를 적용하여 변압기 사고시 발생하는 직류오프셋을 제거함으로써 사고판단 시간을 단축할수 있다.

표 2. 사고판단 시간 비교

구분	10% 충전 단락	40% 충전 단락
No FIR filter	11.45 ms	10.94 ms
FIR filter	7.29 ms	6.76 ms

3. 결 론

본 논문에서는 디지털형 변압기 보호 비율차동 계전기를 구현하였다. 기존의 아날로그형 비율차동 계전기를 디지털형으로 구현할시 고려하여야 하는 실제적인 요소들을 고려하여 변압기 결선 및 CT 결선에 따른 위상 및 크기 보상과 비율차동 계전기의 성능에 주요한 영향을 미치는 동작 특성 곡선의 조정 방법 및 CT mismatch의 영향을 최소화하는 방법을 구현함으로써 실 계통에 적용 가능한 알고리즘을 구현하였다. 변압기 사고시 발생하는 직류오프셋 성분을 FIR 필터를 사용하여 영향을 최소화 함으로서 계전 알고리즘 성능향상을 확인할수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Torp, J. S and Phadke, A. G., "A Microprocessor Based Three-Phase Transformer Differential Relay", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, pp 426-432, 1998
- [2] 강 상희, 김 남호, 강 용철, 김 일동, 박 종근, "계통사고시 지수합수 형태로 감소하는 DC-Offset 성분을 계전신호에서 제거하는 Digital Filter 디자인", 1992년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(A), pp. 59-62, 1992년 7월