

유기전압비를 이용한 변압기 보호계전 알고리즘

강용철, ^이병은, 윤재성, 옥승훈
전북대학교 전자정보공학부

A Protective Relaying Algorithm for Transformers Using the Ratio of Induced Voltages

Y.C. Kang, ^B.E. Lee, J.S. Yun, S.H. Ok
Chonbuk National University

Abstract - This paper presents a protective relaying algorithm for transformers using the ratio of induced voltages. The ratio primary and secondary induced voltages calculated calculates from currents and voltages of primary and secondary windings is used. In case of the steady state and magnetic inrush, it is equal to the turn ratio while it is different from the turn ratio in case of internal winding faults. The proposed algorithm operates satisfactorily even large residual flux.

1. 서 론

기존 변압기 보호에는 차동전류의 2조과 성분을 억제 요소로 하는 전류차동 계전방식이 사용된다. 하지만, 이 방식은 송전선 길이의 증가와 지중 선로의 사용 등의 원인에 의해서 변압기 내부 사고의 경우에도 큰 고조파 성분이 포함될 수 있기 때문에 문제점으로 지적되고 있다.

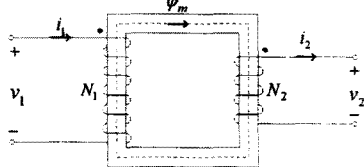
이러한 문제점을 보완하기 위하여 전류와 전압을 동시에 이용하는 방식이 제안되었다. 참고문헌 [1]의 방식은 1차, 2차 전압, 전류 사이의 두 개의 미분방정식으로부터 하나의 미분방정식으로 유도하였고, 여자돌입 시에는 유도한 미분방정식이 성립하지만, 내부 사고 시에는 성립하지 않는다는 점을 이용하였다. 하지만, 3상 변압기에서 델타 결선이 있는 경우에는 식이 다소 복잡하다.

본 논문에서는 유기전압비를 이용한 변압기 보호 계전 알고리즘을 제안한다. 제시한 방식은 1, 2차 전압과 전류로부터 1차, 2차 유기전압을 계산한다. 유기전압비가 여자돌입의 경우에는 권선비와 같은 데 비해, 내부 사고의 경우에는 권선비와는 다른 점을 이용하여, 여자돌입과 내부사고를 구분한다. EMTP를 이용해서 여자돌입과 내부사고를 모델링하여 데이터를 생성하였고, 제시한 방식을 시험하였다.

2. 유기전압비를 이용한 변압기 보호 계전 알고리즘

2.1 단상변압기

그림 1에 단상 2권선 변압기를 나타내었다.



i_1, i_2 : 1차, 2차 전류
 v_1, v_2 : 1차, 2차 단자 전압
 ϕ_m : 상호 자속

N_1, N_2 : 1차, 2차 권선수

그림 1 단상 2권선 변압기

Fig. 1 A single phase two-winding transformer

변압기 내부 사고가 발생하지 않았다면, 매 순간의 1차, 2차 단자 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_1 \tag{1}$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + e_2 \tag{2}$$

여기서, R_1, R_2 : 1차, 2차 권선 저항

L_1, L_2 : 1차, 2차 누설 인덕턴스

e_1, e_2 : 1차, 2차 유기전압

식 (1), (2)에서 유기전압 e_1, e_2 는 1차, 2차 단자 전압과 전류, 권선 저항과 누설 인덕턴스로부터 계산 가능하다. 유기전압비(induced voltage ratio, IVR)를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$IVR = \frac{e_1}{e_2} \tag{3}$$

변압기가 사고가 나지 않았다면, 이 값은 권선비와 같다. 하지만, e_1, e_2 는 순시값이므로, 유기전압비는 e_2 가 0과 가까운 값을 가지면 크게 나타날 수 있으므로, 본 논문에서는 식 (4)의 값이 0이면, 사고가 아닌 정상 상태이고, 0이 아닌 값을 가지면 내부 사고라고 판정한다.

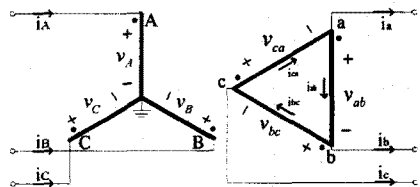
$$Detector = \frac{e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2}{V_{1rms}} \times 100 (\%) \tag{4}$$

여기서, V_{1rms} : 변압기 1차 정격 전압

2.2 삼상 변압기

삼상 Y-Y변압기의 경우에는 단상변압기와 식과 같게 표현되므로 Y-Δ결선변압기만 나타내기로 한다.

그림 2에 단상 2권선 Y-Δ 변압기를 나타내었다.



v_A, v_B, v_C : 각 상의 1차 단자 전압

i_A, i_B, i_C : 각 상의 1차 전류

v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} : 각 권선의 2차 선간전압

i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} : 각 권선의 2차 상전류

그림 2 삼상 2권선 Y-Δ 변압기

Fig. 2 A Two winding three phase wye-delta transformer

그림 2에서 1, 2차측 전압, 전류 관계식은 식 (5)~(10)과 같다.

$$v_A = R_A i_A + L_{IA} \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (5)$$

$$v_B = R_B i_B + L_{IB} \frac{di_B}{dt} + e_B \quad (6)$$

$$v_C = R_C i_C + L_{IC} \frac{di_C}{dt} + e_C \quad (7)$$

$$v_{ab} = R_{ab} i_{ab} + L_{lab} \frac{di_{ab}}{dt} + e_{ab} \quad (8)$$

$$v_{bc} = R_{bc} i_{bc} + L_{lbc} \frac{di_{bc}}{dt} + e_{bc} \quad (9)$$

$$v_{ca} = R_{ca} i_{ca} + L_{lca} \frac{di_{ca}}{dt} + e_{ca} \quad (10)$$

여기서, R_A, R_B, R_C : 각 상의 1차 권선 저항
 L_{IA}, L_{IB}, L_{IC} : 각 상의 1차 누설 인덕턴스
 e_A, e_B, e_C : 각 상의 1차 유기전압
 R_{ab}, R_{bc}, R_{ca} : 2차 각 권선의 권선 저항
 $L_{lab}, L_{lbc}, L_{lca}$: 2차 각 권선의 누설 인덕턴스
 e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} : 2차 각 권선의 유기전압

i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 는 측정할 수 없으므로 식 (8) ~ 식 (10)으로부터 e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} 를 계산할 수 없다. 그런데, i_a, i_b, i_c 만이 측정할 수 있는 값이므로, i_a, i_b, i_c 를 이용하기 위해서, 본 논문에서는 $i_{ca} - i_{ab} = i_a, i_{ab} - i_{bc} = i_b, i_{bc} - i_{ca} = i_c$ 인 관계식을 이용하였다. 또한, 사고가 발생하지 않으면, 델타 결선측 세 상의 권선 저항과 누설인덕턴스가 서로 같다. 즉, $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = R, L_{lab} = L_{lbc} = L_{lca} = L_l$ 이 된다. 따라서, 식(8)~식(10)을 정리하면 다음과 같다.

$$e_{ca} - e_{ab} = v_{ca} - v_{ab} - Ri_a - L_l \frac{di_a}{dt} \quad (11)$$

$$e_{ab} - e_{bc} = v_{ab} - v_{bc} - Ri_b - L_l \frac{di_b}{dt} \quad (12)$$

$$e_{bc} - e_{ca} = v_{bc} - v_{ca} - Ri_c - L_l \frac{di_c}{dt} \quad (13)$$

식 (11) ~ 식 (13)의 좌변들은 계산 가능하다. 또한, 식 (11) ~ 식 (13)과 대응되는 1차 측의 식을 구하기 위해서, 식 (5) ~ 식 (7)의 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$e_C - e_A \quad (14)$$

$$= v_C - v_A - (R_C i_C - R_A i_A) - \left(L_{IC} \frac{di_C}{dt} - L_{IA} \frac{di_A}{dt} \right)$$

$$e_A - e_B \quad (15)$$

$$= v_A - v_B - (R_A i_A - R_B i_B) - \left(L_{IA} \frac{di_A}{dt} - L_{IB} \frac{di_B}{dt} \right)$$

$$e_B - e_C \quad (16)$$

$$= v_B - v_C - (R_B i_B - R_C i_C) - \left(L_{IB} \frac{di_B}{dt} - L_{IC} \frac{di_C}{dt} \right)$$

Y-Δ 변압기의 경우에 내부 사고가 발생하지 않았다면 다음과 같은 유기전압비가 성립한다.

$$\frac{e_A}{e_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_B}{e_{bc}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_C}{e_{ca}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (17)$$

하지만, Y 결선 측의 e_A, e_B, e_C 는 계산할 수 있어도, Δ결선 측의 e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} 는 계산할 수 없으므로, 식 (17)을 사고 판정에 직접 이용할 수 없다. 따라서, Y-Δ 변압기의 경우에 사용될 수 있는 유기전압비를 식 (18)에 나타내었다. 식 (17)와 식 (18)은 필요충분조건이다. 따라서, 식 (18)의 좌변들의 분모와 분자는 식 (11) ~ 식 (17)을

이용하여 계산 가능하므로, 식 (18)을 사고 판정에 이용한다.

$$\frac{e_C - e_A}{e_{ca} - e_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_A - e_B}{e_{ab} - e_{bc}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{e_B - e_C}{e_{bc} - e_{ca}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (18)$$

Y-Δ 변압기의 경우에 본 논문에서 사고 판정에 사용된 Detector는 다음과 같다.

$$Detector\ 1 = \frac{e_C - e_A - \frac{N_1}{N_2}(e_{ca} - e_{ab})}{V_{CArms}} \times 100 (\%) \quad (19)$$

$$Detector\ 2 = \frac{e_A - e_B - \frac{N_1}{N_2}(e_{ab} - e_{bc})}{V_{ABrms}} \times 100 (\%) \quad (20)$$

$$Detector\ 3 = \frac{e_B - e_C - \frac{N_1}{N_2}(e_{bc} - e_{ca})}{V_{BCrms}} \times 100 (\%) \quad (21)$$

위의 Y-Δ 변압기의 경우에 세 개의 Detector를 이용하여 사고를 판정하는 규칙은 다음과 같다.

세 개의 detector가 모두 0이면 내부 사고가 아니며, 셋 중의 하나의 Detector가 0이면 내부 사고라 판단하며, 사고 난 상을 구분한다. 하지만, 두 상 이상이 동시에 사고가 발생한 경우에는 사고를 판정할 수는 있지만, 사고 상을 구분할 수 없다.

3. 사례연구

제시한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 그림 3과 같은 모델계통을 선택하였다. 사용한 변압기는 3상 Y-Δ결선, 154kV/14.7kV, 100[MVA]이다. 1차 권선의 층간 단락 사고와 지락 사고를 EMTP로 모델링하였고[2], 또한, 여자돌입 현상을 모델링하여, 1차, 2차 전압, 전류의 데이터를 생성하였다. 샘플링 비율은 주기 당 16 샘플로 하였다.

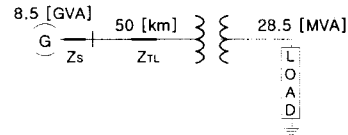


그림 3 모델 계통
 Fig. 3 A model system

3.1 여자돌입

여자돌입은 무부하 시, 전원 투입 위상각이 0도인 경우에, 철심에 잔류자속이 없는 경우와 포화점의 +80%가 있는 경우에 대하여 모의했다.

이중에서 그림 4에 잔류자속이 포화점의 80%인 경우 각 상의 차동전류를 나타내었고, 그림 5에는 Detector1의 $e_C - e_A$ 와 $N_1/N_2(e_{ca} - e_{ab})$ 을 나타내었다. 여자돌입이 발생하여 큰 전류가 흘렀지만, 계산한 두 개의 전압이 거의 같음을 알 수 있다.

그림 6에 세 개의 Detector와 트립 신호를 나타내었다. 카운터를 두어 Detector가 5%이상이면 카운터를 1을 증가시키고, 5% 미만이면 1을 감소하였으며, 카운터가 4가 되면 최종 트립을 결정하였다. 변압기 투입이후 차동전류(여자전류)는 A상의 경우 최대값이 1600[A]에 이르렀지만, Detector는 5%이내가 되어, 트립 신호가 발생되지 않았다.

그림 5의 Detector는 유기전압을 계산하는 과정에서 미분항을 근사할 때 발생하는 오차이다. 본 논문에서는 주기 당 16 샘플인 경우에 대해 사례 연구를 행하였지만, 샘플링 비율을 높이면 오차는 현저하게 줄어든다.

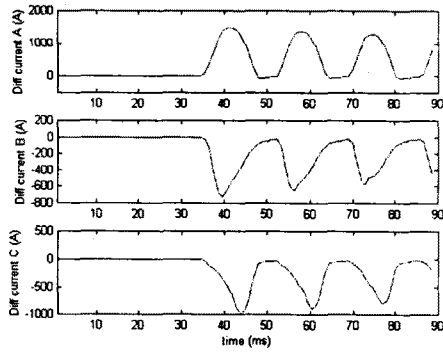


그림 4 차동전류 (80% 잔류자속)
Fig. 4 Differential currents (80% remanent flux)

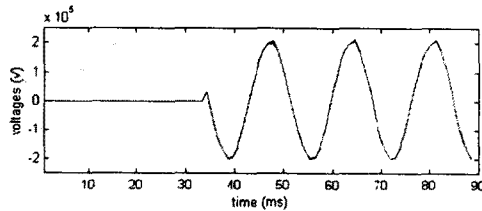


그림 5 Detector1의 $e_C - e_A$ 와 $N_1/N_2(e_{ca} - e_{cb})$
Fig. 5 $e_C - e_A$ and $N_1/N_2(e_{ca} - e_{cb})$ of Detector1

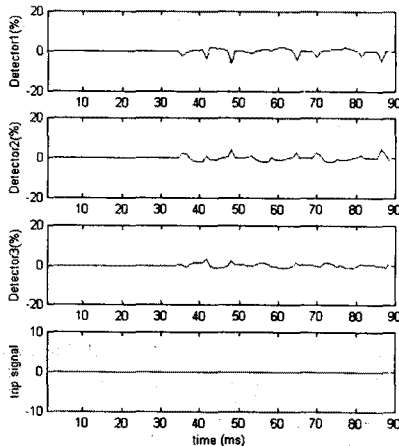


그림 6 Detector와 트립 신호(80% 잔류자속)
Fig. 6 Detectors and trip signal (80% remanent flux)

3.2 내부사고

내부사고는 사고 권선의 밑에서 40% 지점의 지락사고, 밑에서 20% 지점과 40% 지점의 층간단락사고, 밑에서 60% 지점과 80% 지점의 층간단락사고를 모의하였고, 사고 위상각은 각각 0도와 90도로 하였다.

이 중에서 그림 7은 B상의 밑에서 40%부분에서 0도 지락사고 시 Detector값을 나타냈다. 제시한 방식은, 사고 후 4.167[ms]에(약 1/4 주기) 사고로 판정하였다.

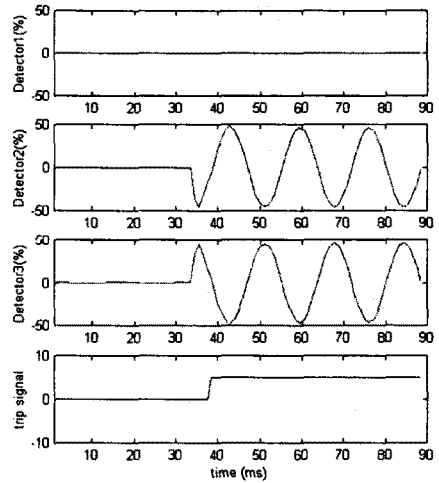


그림 7 B상 40% 지락사고 시 Detector
Fig. 7 Detectors in case of 40% B turn-to-ground fault

3. 결 론

본 논문에서는 변압기의 1차, 2차 유기전압비를 이용해서 내부 사고와 내부 사고가 아닌 여자돌입, 외부 사고를 구분하는 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 변압기의 1차, 2차 전압, 전류의 관계식으로부터 1차, 2차의 유기전압을 계산하고 이들의 비로써 내부 사고와 여자돌입을 구분하였다. 여자돌입은 투입 위상각과 잔류자속을 달리하여 모의하였고, 지락 사고, 층간 단락 사고는 사고 위상각과 사고 위치를 달리하여 모의하여 제시한 방식을 시험한 결과, 제시한 방식은 내부 사고와 여자돌입을 잘 구분함을 확인하였다. 또한, 외부 사고 시에도 오동작하지 않음을 알 수 있었으며, 변압기 내부 사고 시, 사고 후 1/4주기 이내에 트립 신호를 발생시켜 매우 빠르게 내부 사고를 인식함을 알 수 있다.

제시한 방식은 복잡한 철심의 히스테리시스 데이터가 필요 없으며, 코어의 계절이 달라지거나, 계통 조건이 달라지더라도 별도의 많은 수정이 없이 적용 가능한 방식이며, 시간영역에서 보호를 수행하기 때문에 계전기의 동작시간을 감소할 수 있으며, 샘플링 비율을 높이면 계전기 동작시간을 더욱 감소할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, H.C. Wood, "A Digital Relaying Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults", IEEE Trans. on PWRD, vol.4, no.3, pp. 1638-1648, July 1989
- [2] P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PWRD, vol.9, no.2, pp. 690-699, April 1994