쇄교자속비를 이용한 변압기 보호 알고리즘

강용철 · 이병은 · 김은숙* · 원성호 · 임의재
전북대학교 전자정보 공학부, 차세대전력기술연구센터

A Transformer Protective Relaying Algorithm Based on Increment of Flux Linkages

Y.C. Kang, B.E Lee, E.S. Jin*, S.H Won, U.J. Lim
Chonbuk National University, NPT Center

Abstract - This paper propose a transformer protective relaying algorithm based on the increment of flux linkages (RIFL) of the primary and secondary windings. The RIFL is equal to the turn ratio for all operating conditions except an internal faults. For a single-phase transformer and three-phase Y-Y transformer, the increments of flux linkages are calculated and their ratios are compared with the turn ratio. For a three-phase Y-△ transformer, the difference of the increments of flux linkages are calculated to use the line currents instead of the delta winding currents, which are practically unavailable. Their ratios are compared with the turn ratio. The results of various tests show that the algorithm successfully discriminates internal faults from normal operation conditions such as magnetic inrush and overexcitation. The algorithm can not only detect internal winding faults, but reduce the relay's operating time.

1. 서 론

변압기 보호의 주된 내용은 변압기 내부사고와 내부사고가 아닌 것(여자돌입, 과여자, 외부사고)을 구분하는 것이다. 변압기 보호용으로 주로 사용되고 있는 전류차동 방식은 여자돌입과 과여자 시에 오동작을 방지하기 위하여 고조파억제 및 방지, 파형식별 등의 방법을 사용하고 있다. 고조파 억제 및 방지법은, 여자 돌입의 경우에는 차동전류의 2조파, 과여자의 경우에는 5조파성분을 억제요소로 사용한다[1]. 이 방식은 차전류에 고조파가 많이 포함되어 있지 않은 경우에는 오동작할 가능성이 존재한다.

차전류에 포함되어 있는 고조파에 영향을 받지 않도록 하기 위해서, 변압기 모델에 기초한 방식들이 제안되었다[2, 3]. 이들의 동작속도는 매우 빠르다. 참고문헌 [2]의 방식은 선형 소자만을 이용하였기 때문에, 코어의 조건에 영향을 받지 않지만 3상 변압기에서 델타 결선이 있는 경우에는, 델타 권선 전류의 순환 성분을 추정하는 별도의 방법이 필요하다.

참고문헌 [3]의 방식은 유기 전압비가 여자돌입, 과여자 시에는 권선비와 같은 반면에, 내부 사고 시에는 권선비와 같지 않은 원리를 이용하였다. 하지만, 이 방식은 미분을 근사하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

본 논문은 쇄교 자속증분비가 내부사고 시에는 권선비와 같지 않고, 여자돌입, 과 여자 시에는 권선비와 같은 원리를 사용하는 변압기 보호 방식에 대해서 기술한다. 참고문헌 [4]에서는 미분을 사용한 반면, 제시한 방식을 적분을 사용하기 때문에, 수치 오차가 적다. 제시한 방식의 성능을 여자돌입, 내부사고, 과여자 등의 경우에 대해서 시험하였다.

2. 쇄교 자속비를 이용한 변압기 보호계전 알고리즘

2.1 단상 변압기

그림 1은 단상 변압기를 나타낸다. 내부사고가 없다면, 각 권선의 단자 전압은 다음과 같다.

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{l1}\frac{di_1}{dt} + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (1)$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_{l2}\frac{di_2}{dt} + \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = v_1 - R_1 i_1 - L_{l1}\frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = v_2 + R_2 i_2 + L_{l2}\frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

각 쇄교자속의 증분 $\triangle\lambda_1$와 $\triangle\lambda_2$는, 각각 식 (3), 식 (4)의 우변을 적분하여 계산할 수 있다. 두 권선의 쇄교자속 증분의 비를 다음과 같이 정의한다.

$$RIFL \equiv \frac{\triangle\lambda_1}{\triangle\lambda_2} \quad (5)$$

정상상태에서는 $\triangle\lambda_1 = 0$, $\triangle\lambda_2 = 0$인 경우를 제외하고는 $RIFL$는 권선비 N_1/N_2 와 같다. 또한, 여자돌입과 과여자의 경우에도, $RIFL$는 권선비 N_1/N_2와 같다. 한편, 내부사고의 경우에는, 사고 상에 해당하는 쇄교 자속비가 권선비와 같지 않다. 따라서, 본 논문에서는 $RIFL$를 이용하여 내부사고와 여자돌입 및 과여자를 구분하고자 한다.

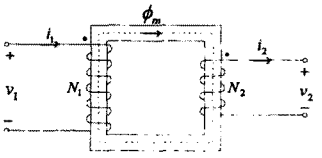

그림 1 단상 변압기

그런데, $\triangle\lambda_1$와 $\triangle\lambda_2$가 순시값이므로, $\triangle\lambda_1=0$, $\triangle\lambda_2=0$, 인 경우에 *RIFL*는 권선비가 되지 않는다. 따라서, 식 (5)의 RIFL 대신, 식 (6)의 디텍터를 사용하여, 변압기를 보호 하고자 한다. 즉, 식 (6)의 값이 0이면 내부사고가 아니고, 0이 아니면 내부사고로 판단한다. 디텍터의 값의 의미는 추정한 두 쇄교 자속증분의 차이를 백분율로 표현한 것이 된다.

$$Detector=\frac{\triangle\lambda_1-\frac{N_1}{N_2}\triangle\lambda_2}{\sqrt{2}V_1\cdot T}\times100(\%) \quad (6)$$

2.2 3상 Y-△ 변압기

그림 2에 3상 Y-△ 변압기를 나타내었다. Y결선에 해당하는 1차 권선의 전압은 식(7)~(9)로 나타내고, △결선에 해당하는 2차 권선의 전압은 (10)~(12)로 나타낸다.

$$v_A=R_Ai_A+L_{lA}\frac{di_A}{dt}+\frac{d\lambda_A}{dt} \quad (7)$$

$$v_B=R_Bi_B+L_{lB}\frac{di_B}{dt}+\frac{d\lambda_B}{dt} \quad (8)$$

$$v_C=R_Ci_C+L_{lC}\frac{di_C}{dt}+\frac{d\lambda_C}{dt} \quad (9)$$

$$v_{ab}=R_{ab}i_{ab}+L_{lab}\frac{di_{ab}}{dt}+\frac{d\lambda_{ab}}{dt} \quad (10)$$

$$v_{bc}=R_{bc}i_{bc}+L_{lbc}\frac{di_{bc}}{dt}+\frac{d\lambda_{bc}}{dt} \quad (11)$$

$$v_{ca}=R_{ca}i_{ca}+L_{lca}\frac{di_{ca}}{dt}+\frac{d\lambda_{ca}}{dt} \quad (12)$$

권선전류인 i_{ab}, i_{bc}와 i_{ca}를 측정하기 어렵기 때문에 $\triangle\lambda_{ab}$, $\triangle\lambda_{bc}$와 $\triangle\lambda_{ca}$는 식(10)~(12)로부터 직접 계산이 어렵다. 그런데 i_a, i_b와 i_c는 측정가능 하기 때문에 i_{ab}, i_{bc}와 i_{ca}는 선전류와 권선 전류간의 관계식 (13)을 이용하면 계산가능하다.

$$i_{ca}-i_{ab}=i_a,\ i_{ab}-i_{bc}=i_b,\ i_{bc}-i_{ca}=i_c \quad (13)$$

Y-△ 변압기의 경우에, 내부사고가 나지 않으면 식 (14)과 (15)가 성립한다.

$$R_{ab}\approx R_{bc}\approx R_{ca}=R,\ L_{lab}\approx L_{lbc}\approx L_{lca}=L_l \quad (14)$$

$$\frac{\triangle\lambda_A}{\triangle\lambda_{ab}}=\frac{N_1}{N_2},\ \frac{\triangle\lambda_B}{\triangle\lambda_{bc}}=\frac{N_1}{N_2},\ \frac{\triangle\lambda_C}{\triangle\lambda_{ca}}=\frac{N_1}{N_2} \quad (15)$$

그런데, $\triangle\lambda_A$, $\triangle\lambda_B$, $\triangle\lambda_C$ 는 계산이 가능하지만 $\triangle\lambda_{ab}$, $\triangle\lambda_{bc}$, $\triangle\lambda_{ca}$는 계산이 불가능하기 때문에, 식 (15)는 디텍터에 직접 적용이 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 식 (15) 대신에 식 (16)를 사용하였다. 식 (15)는 식 (16)과 필요충분 조건이다.

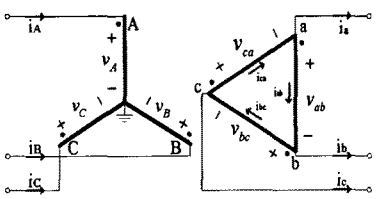

그림 2 3상 Y-△ 변압기

$$\frac{\triangle\lambda_C-\triangle\lambda_A}{\triangle\lambda_{ca}-\triangle\lambda_{ab}}=\frac{N_1}{N_2},\ \frac{\triangle\lambda_A-\triangle\lambda_B}{\triangle\lambda_{ab}-\triangle\lambda_{bc}}=\frac{N_1}{N_2},\ \frac{\triangle\lambda_B-\triangle\lambda_C}{\triangle\lambda_{bc}-\triangle\lambda_{ca}}=\frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

따라서, 이 경우에 디텍터는 다음과 같이 주어진다.

$$Detector1=\frac{\triangle(\lambda_C-\lambda_A)-\frac{N_1}{N_2}\triangle(\lambda_{ca}-\lambda_{bc})}{\sqrt{2}V_{CA}\cdot T}\times100(\%) \quad (17)$$

$$Detector2=\frac{\triangle(\lambda_A-\lambda_B)-\frac{N_1}{N_2}\triangle(\lambda_{ab}-\lambda_{bc})}{\sqrt{2}V_{AB}\cdot T}\times100(\%) \quad (18)$$

$$Detector3=\frac{\triangle(\lambda_B-\lambda_C)-\frac{N_1}{N_2}\triangle(\lambda_{bc}-\lambda_{ca})}{\sqrt{2}V_{BC}\cdot T}\times100(\%) \quad (19)$$

식 (17)~(19)의 디텍터를 이용하게 되면, 표1의 규칙으로부터 사고 상 구분이 가능하다.

표 1 사고 상을 판정하는 규칙

Detector1	Detector2	Detector3	사고권선 구분	
≈0	≈0	≈0	내부사고 아님	
≠0	≠0	≈0	A상	내부사고
≈0	≠0	≠0	B상	
≠0	≈0	≠0	C상	
다른 경우			내부사고	

3. 사례연구

그림 3은 모델 계통을 나타낸다. 3상 Y-△ 변압기(154kV/12.7kV, 55MVA)를 EMTP를 이용하여 모델링하였다. 참고문헌 [4]의 내부사고 모델링 방법을 사용해서 변압기 내부사고 데이터를 생성하였다.

샘플링 비율은 주기당 32샘플을 사용하였으며, 저역통과 필터로는 저지대역 컷옵 주파수를 960 [Hz]인 1차 RC필터를 설계하여, 모든 전압, 전류를 통과시켰다.

철심의 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 EMTP내의 type-96 소자를 사용하였고, HYSDAT을 사용하기 위한 포화점은 (40A, 822Vs)을 선택하였다.

제시한 방식을 여자돌입, 내부사고, 과여자의 경우에 대하여, 시험하였으며, 사례연구에서는 Detector와 트립신호만을 나타내었다.

3.1 여자돌입

디텍터의 임계값은 수치 오차와 계전기의 감도 등에 따라 결정된다. 본 논문에서는 5%를 사용하였고, 과도신호에 의한 오동작을 방지하기 위하여 카운터를 사용하였다. 만약 디텍터가 5%보다 크면, 카운터를 1 증가시키고, 작으면 1을 감소시킨다. 또한, 카운터가 0보다 작으면 0으로 한다. 카운터가 4를 초과하게 되면 트립신호를 발생시킨다.

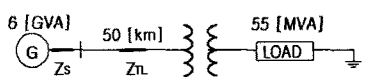

그림 3 모델 시스템

그림 4는 무 부하투입, 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%인 경우의 디텍터와 트립 신호를 나타내었다. Trip 신호는 Detector1~3의 결과로부터 발생된다. 모든 디텍터가 5% 이내이므로, Trip 신호는 발생되지 않았다.

3.2 내부사고

그림 5는 1차 권선의 B상 권선에서, 중성점으로부터 20%와 30%지점 사이에 0도 층간단락사고 발생시의 디텍터와 트립신호를 나타내었다. 1차 권선 B상 사고이므로, Detector 2와 3만 임계값을 넘음을 그림 5를 통해서 알 수 있다. 또한, 사고 발생이후 5.2 ms에 Trip 신호가 발생되었다.

3.3 과여자

그림 6은 1차 권선에 정격전압의 150%(즉, 상전압-133Kv)를 인가한 과 여자인 경우의 디텍터와 트립 신호를 나타내었다. 디텍터가 여자돌입에 비해서 값이 크기는 하지만, 5% 이내이므로, Trip 신호는 발생되지 않았다.

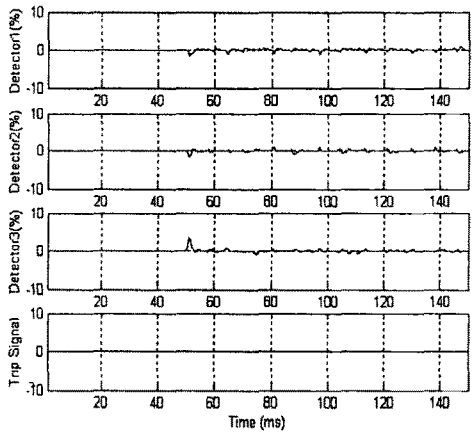

그림 4 디텍터와 트립 신호

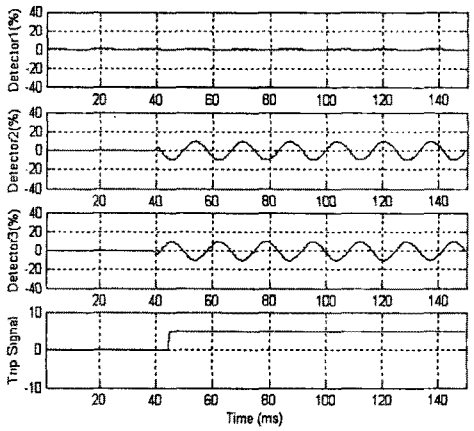

그림 5 디텍터와 트립 신호

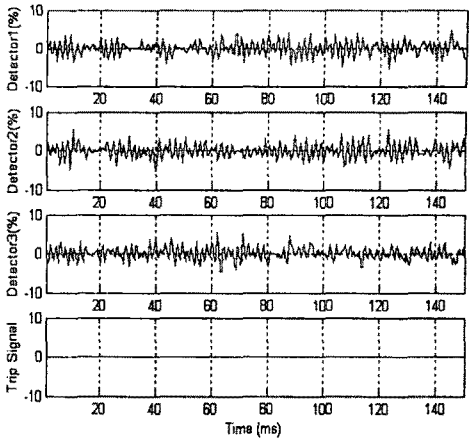

그림 6 디텍터와 트립 신호

4. 결 론

본 논문에서는 쇄교 자속비를 이용한 변압기 보호 방식을 제안하였다. 제시한 방식은 여자돌입과 과여자시, 매우 왜곡된 전압, 전류로부터 쇄교자속증분비를 정확하게 계산하므로, 내부사고를 여자돌입, 과여자와 정확하게 구분하였다. 게다가, 제시한 방식은 사고 상의 구분이 가능하다.

제시한 방식은 복잡한 히스테리시스 데이터를 사용하지 않으며, 시간 영역에서 동작하므로 고조파 억제 전류차동계전기 보다 빠른 동작이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] Applied Protective Relaying, Westinghouse Electric Corporation, USA, 1976

[2] SACHDEV, M.S., SIDHU, T.S., WOOD, H.C., "A Digital Relaying Algorithm for Detection Transformer Winding Faults", IEEE Trans.,1989, PWRD 4, (3), pp.1638 1648

[3] Y. C. Kang, B. E. Lee, S. H. Kang, S. S. Kim, J. K. Lee, "A Transformer Protective Relaying Algorithm Using the Ratio of Induced Voltages," IEEE PES 2001 SM, July 15 ~ 19, 2001, Vancouver, BC, Canada

[4] 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