

차동전류의 변화율을 이용한 변압기의 여자돌입과 내부사고 구분 알고리즘

강용철, ^이병은, 윤재성
전북대학교 전자정보공학부

A Discriminating Algorithm between Magnetizing Inrush and Internal Faults of Transformers Using Difference of a differential current

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

Abstract - This paper presents a discriminating algorithm between magnetizing inrush and internal faults of transformers using difference of a differential current. Incase of inrush, change of magnetizing inductance repeats. Thus, second difference of differential current periodically shows pulse while periodic pulse is not represented in case of internal winding fault. The proposed algorithm is suitable irrespective of the amount of remanent flux

1. 서 론

변압기 보호용 계전방식으로는 발전기, 송전선의 경우와 마찬가지로 전류차동 계전방식이 주로 사용되어 왔다. 그런데, 내부 사고와 여자 돌입 현상을 구분하기 위해서는 차동전류를 동작 전류로 하고, 2조파를 억제전류로 하는 전류차동 방식을 사용하고 있으며, 내부사고와 과여자 현상을 구분할 목적하기 위해서는 5조파 전류 억제전류로 하는 비율 전류차동 방식을 사용하고 있다. 하지만 이러한 방식은 변압기에 잔류자속이 있으면 각 조파 성분의 크기가 달라질 뿐만 아니라, 계통 조건 및 변압기 코어의 재질의 조건이 변하는 경우에는, 내부사고 시에도 2조파 성분이 많이 포함할 수 있는 문제점이 지적되고 있다. 또한, 주파수영역에서 판단을 하기 때문에 한주기 동안의 시간이 많이 필요하다.[1~3]

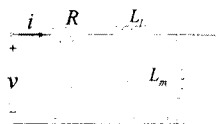
여자돌입현상이란 철심 자속이 포화점을 초과했다가 다시 포화점 이하로 감소하여, 자화 전류가 급격하게 증가/감소를 반복하는 현상이다. 따라서, 차동전류가 급격한 증가/감소를 반복하게 된다.

본 논문에서는 차동전류의 차분을 억제요소로 하여, 변압기의 내부사고와 여자돌입을 구분하는 알고리즘을 제안한다. 차동전류의 2차 차분이 설정값보다 크면 여자돌입, 작으면 내부사고로 판정한다. 먼저, 변압기의 여자돌입시의 차동전류를 해석적으로 전개하여 이의 1차 미분과 2차 미분을 살펴보았다. 잔류자속의 양을 변화시키고, 내부사고를 모델링하여 제시한 방식의 성능을 검증하였다.

2. 차동전류의 변화율을 이용한 변압기의 여자돌입과 내부사고 구분 알고리즘

2.1 여자돌입 시 단상변압기 해석

여자돌입 시 단상 2권선 변압기를 해석하기 위해 등가 회로를 그림 1에 나타내었다.



여기에서 i : 1차측 전류

v : 1차측 전압
 R : 1차측 권선저항
 L_m : 자화 인덕턴스

그림 1. 여자돌입 시 단상 2권선 변압기 등가회로

전압, 전류 관계식은 식 (1)과 같다.

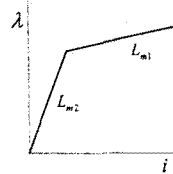
$$v = Ri + L_1 \frac{di}{dt} + L_m \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$v = A \sin(\omega t + \theta)$ 이라 하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$A \sin(\omega t + \theta) = Ri + L_1 \frac{di}{dt} + L_m \frac{di}{dt} \quad (2)$$

여기에서 θ : 전압의 투입 위상각

식 (2)에서 L_m 는 비선형 요소이기 때문에, 해석을 위해 그림 2와 같이 선형화 시켰다.



L_{m1} : 비포화 시 자화 인덕턴스

L_{m2} : 포화 시 자화 인덕턴스

그림 2. 선형화된 $\lambda-i$ 곡선

2.1.1 비포화영역에 있을 때

$t = T_0$ 에서 변압기를 투입했다고 가정한다. 그림 2의 $\lambda-i$ 곡선에서 $L_m = L_{m1}$ 이므로, 차동전류는 식 (3)과 같다.

$$Ri + (L_1 + L_{m1}) \frac{di}{dt} = A \sin(\omega t + \theta), T_0 \leq t, i(T_0) = 0 \quad (3)$$

식 (3)을 풀면 식 (4)와 같다.

$$i = \frac{A}{Z_1} \sin(\omega t + \theta - \phi_1) \quad (4)$$

$$- \left(\frac{A}{Z_1} \sin(\omega T_0 + \theta - \phi_1) - i(T_0) \right) e^{-\frac{(t-T_0)}{\tau_1}}$$

여기에서 $\tau_1 = \frac{L_1 + L_{m1}}{R}$

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (\omega(L_1 + L_{m1}))^2}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{\omega(L_1 + L_{m1})}{R}$$

$i(T_0)$: 초기 전류 값

식(4)의 1차 미분과 2차 미분을 구하면 식(5), (6)과 같다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{A\omega}{Z_1} \cos(\omega t + \theta - \phi_1) - \left[\frac{A}{Z_1 \tau_1} \sin(\omega T_0 + \theta - \phi_1) - \frac{i(T_0)}{\tau_1} \right] e^{-\frac{(t-T_0)}{\tau_1}} \quad (5)$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)^2 = -\frac{A\omega^2}{Z_1} \sin(\omega t + \theta - \phi_1) - \left[\frac{A}{Z_1 \tau_1} \sin(\omega T_0 + \theta - \phi_1) - \frac{i(T_0)}{\tau_1} \right] e^{-\frac{(t-T_0)}{\tau_1}} \quad (6)$$

2.1.2 포화영역에 있을 때

그림 2의 $\lambda-i$ 곡선에서 $L_m = L_{m2}$ 이므로 차동전류 관계식을 나타내면 식 (7)과 같다.

$$Ri + (L_1 + L_{m2}) \frac{di}{dt} = A \sin(\omega t + \theta), \quad T_1 \leq t \quad (7)$$

비포화영역과 마찬가지로 포화영역에서 전류, 1차 미분, 2차 미분을 구하면 식 (8)~(10)과 같다.

$$i = \frac{A}{Z_2} \sin(\omega t + \theta - \phi_2) - \left(\frac{A}{Z_2} \sin(\omega T_1 + \theta - \phi_2) - i(T_1) \right) e^{-\frac{(t-T_1)}{\tau_2}} \quad (8)$$

여기에서 $\tau_2 = \frac{L_1 + L_{m2}}{R}$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + (\omega(L_1 + L_{m2}))^2}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{\omega(L_1 + L_{m2})}{R}$$

$i(T_1)$: 포화종료 시 전류값

$$\frac{di}{dt} = \frac{A\omega}{Z_2} \cos(\omega t + \theta - \phi_2) - \left[\frac{A}{Z_2 \tau_2} \sin(\omega T_1 + \theta - \phi_2) - \frac{i(T_1)}{\tau_2} \right] e^{-\frac{(t-T_1)}{\tau_2}} \quad (9)$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)^2 = -\frac{A\omega^2}{Z_2} \sin(\omega t + \theta - \phi_2) - \left[\frac{A}{Z_2 \tau_2} \sin(\omega T_1 + \theta - \phi_2) - \frac{i(T_1)}{\tau_2} \right] e^{-\frac{(t-T_1)}{\tau_2}} \quad (10)$$

변압기 투입 시의 시간은 0으로 하고 초기전류를 0으로 했을 때, 전류와, 1차 미분, 2차 미분의 한 주기 동안 파형을 그림 3에 나타냈다.

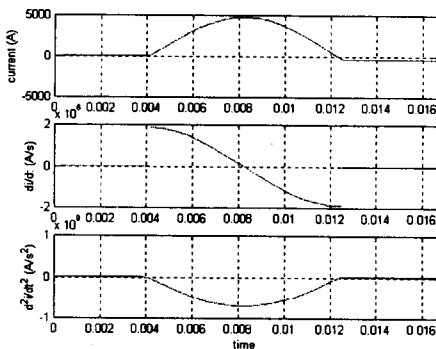


그림 3. 전류, 1차 미분, 2차 미분의 파형

그림 3의 1차 미분 파형은 비포화영역에서 포화영역으로, 포화영역에서 비포화영역으로 변화할 때 2×10^6 정

도의 큰 차이를 보인다. 또한 2차 미분에서 상태가 변화할 때 연속된 것 처럼 보이지만 실제로는 비포화영역의 마지막 값은 -1.2518×10^3 , 포화영역의 처음 값은 -3.1606×10^7 로 1차 미분보다 3.1605×10^7 정도의 큰 차이가 난다. 이러한 특성은 여자돌입의 특성이라고 할 수 있다. 즉, 변압기 투입시 철심의 포화로 자화 인덕턴스 값이 커졌다 작아졌다를 주기적으로 반복하기 때문에 이러한 차이가 난다고 할 수 있다.

3. 사례연구

제시한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 그림 4와 같은 모델계통을 선택하였다. 사용한 변압기는 154kV/22.9kV, 용량이 30[MVA]이고, 발전기 용량은 6[GVA], 부하 용량은 9[MVA]이다. EMTP로 변압기 내부사고를 1차 권선의 단락사고와 지락사고를 모델링하였고, 1차, 2차 전압, 전류의 데이터를 생성하였다. 내부사고를 모델링하는 방법은 참고문헌 [4]의 방식을 이용하였다.

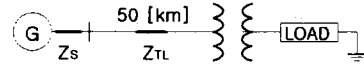


그림 4. 모델 계통

여기서는 미분식을 사용할 수 없으므로 차분식을 사용한다. 차분은 현재 샘플 값과 전 샘플 값의 차이이기 때문에 급격히 변화하는 순간 큰 값을 가진다. 이러한 특성을 이용하여 여자돌입과 내부사고를 구분하고자 한다.

사례 그림에서 current, diff1, diff2, trip은 각각 차동전류, 1차 차분, 2차 차분, 트립 신호를, diff3는 diff2의 변화량 중 첫 번째 큰 값으로 정규화 시킨 값을 나타냈다.

사고판정은 차동전류가 설정값보다 크게 나타나면 트립 신호를 0.5 증가시키고, diff3가 0.3보다 큰 값이 또 나오면 trip 신호를 0으로 하였다. 그런데, 3/4주기동안 diff3가 이러한 큰 값이 나오지 않으면 내부사고로 판정하였다.

3.1 여자돌입

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

그림 5, 6은 각각 잔류자속이 없는 경우와 포화점의 80%가 있는 경우의 차동전류, diff1, diff2, diff3이다.

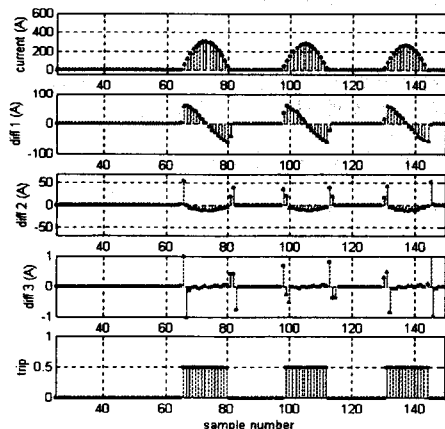


그림 5. 차동전류, diff1, diff2, diff3(무 잔류자속)

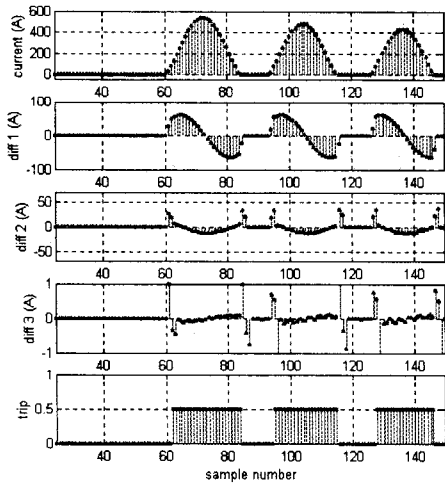


그림 6. 차동전류, diff1, diff2, diff3(80% 잔류자속)

그림 5, 6에서 알 수 있듯이 여자돌입 시 diff3가 비포화영역에서 포화영역으로, 포화영역에서 비포화영역으로 변화한 순간 큰 양수 값을 가진다. 트립 신호는 차동전류가 설정값보다 커져서 0.5값이 되었고 포화영역에서 비포화영역으로 변화할 때 다시 0값이 되어 내부 사고로 판정하지 않았다.

3.2 내부사고

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

이 중에서, 그림 7, 8은 각각 1차측 권선의 밑에서 40%부분의 0도 지락사고, 60~80% 층간 단락 사고 시 차동전류, diff1, diff2, diff3을 나타냈다.

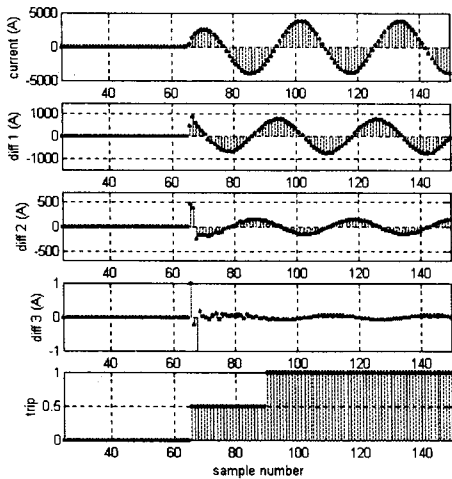


그림 7. 지락사고 시 차동전류, diff1, diff2, diff3

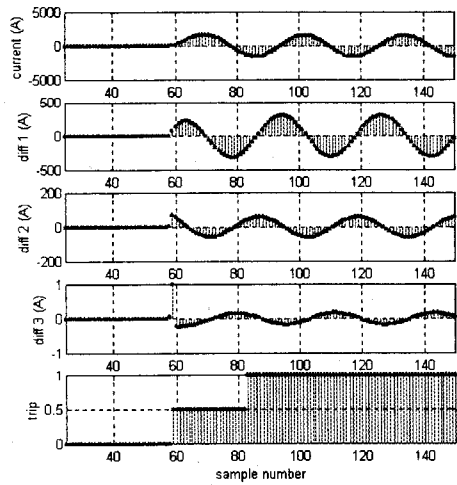


그림 8. 층간 단락 사고 시 차동전류, diff1, diff2, diff3

그림 7, 8에서 알 수 있듯이 트립 신호는 차동전류가 설정 값보다 커져서 0.5값이 되었다. diff3는 사고 순간에는 큰 값을 갖는다. 3/4주기동안 diff3가 0.3값보다 큰 값이 나오지 않아서 트립 신호는 1값이 되어 내부 사고로 판정하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 차동전류를 2차 미분해서 변화율이 크면 여자돌입, 변화율이 작으면 내부사고로 판정하는 알고리즘을 제시한다. 여자돌입은 잔류자속을 달리해서 모의하였고, 지락사고, 층간 단락 사고는 사고 위상각과 사고위치를 달리해서 모의한 결과 여자돌입에서는 2차 차분 변화량이 비포화영역에서 포화영역으로, 포화영역에서 비포화영역으로 변화한 순간 큰 값이 나타나 내부사고와 다름을 알 수 있었다.

본 논문의 장점은 전류만 사용하고 수식이 변화율을 따지기 때문에 잔류자속이 있을 경우에도 여자돌입과 내부사고를 구분할 수 있다. 또한, 시간 영역에서 행하기 때문에, 계전기 동작시간을 감소할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Bergen, "Power System Analysis", Prentice Hall, 2000
- [2] Blackburn, "Protective Relaying", Marcel Dekker, 1998
- [3] S.H. Horowitz, A.G. Phadke, "Power System Relaying", Research Studies, 1992
- [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