

## 차전류의 차분을 이용한 변압기 보호용 전류차동 계전방식

강용철, 김대성, 이병은, 김은숙, 원성호,  
전북대학교 전자정보 공학부, 차세대전력기술연구센터

### A Current Differential Relaying Algorithm for Power Transformers Using the Difference of a Differential Current

Y.C. Kang, D.S. Kim, B.E. Lee, E.S. Kim, S.H. Won  
Chonbuk National University, NPT Center

**Abstract** - This paper proposes a current differential relaying algorithm for power transformers using the third difference function of a differential current. The algorithm observes the instants when the wave-shape of the differential current is changed due to the change of the magnetization inductance. If the value of the third difference is bigger than the threshold, the output of a current differential relay is blocked for a cycle. In the cases of magnetic inrush and overexcitation, the blocking signal is maintained; however, for internal faults, reset in a cycle. The test results clearly show that the algorithm successfully distinguishes internal faults from magnetizing inrush.

#### 1. 서 론

변압기 보호계전방식으로는 사고 시 특징중의 하나인 차동전류의 증가를 이용하는 전류차동 계전방식이 주로 사용되어왔다. 하지만, 전류차동 계전방식은 여자돌입에 의해서 오동작할 수 있으므로 내부사고와 여자돌입을 구분하기 위해서 차동전류의 고조파 성분을 이용하여 차동 전류를 동작전류로 2조파를 억제전류로 하는 고조파억제 전류차동 계전방식이 사용되고 있으며, 내부사고와 과여자를 구분할 목적으로 2조파에 과여자시 많이 나타나는 5조파를 포함하여 억제전류로 사용하는 전류차동 계전방식도 쓰인다. 하지만 고조파를 이용하는 방식은 잔류자속이 있을 경우 각 조파 성분의 크기가 달라지고, 제동조건 및 변압기 코어의 재질이 변하는 경우에는 내부사고 시에도 2조파 성분이 많이 포함될 수 있는 문제점이 있다.[1-3]

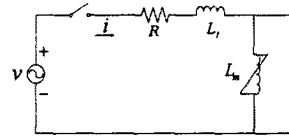
여자돌입이란 철심의 비선형에 기인한 것으로, 철심 자속이 포화점을 초과했다가 다시 감소함에 따라 자화전류가 급격히 증가하거나 감소하는 현상이다. 여자돌입 시 변압기 1차에서 2차의 전류를 뺀 차전류가 비포화구간과 포화구간에서 파형의 변화를 가지게 된다.

본 논문에서는 차전류의 차분을 이용 차전류의 변화를 검출하여 내부사고와 여자돌입을 구분하는 알고리즘을 제안한다. 차전류의 변화가 검출되면 일정시간동안 전류차동 계전기의 출력을 방지함으로써 내부사고와 여자돌입을 구분한다. 변류기가 포화된 경우에도 오동작하지 않도록 로직을 구성하였다.

#### 2 차전류의 차분을 이용한 변압기 보호 알고리즘

##### 2.1 여자돌입 시 변압기와 차분 적용 특성 해석

여자돌입시 변압기의 해석을 위해 변압기의 등가회로를 그림 1에 나타내었다. 해석을 간단히 하기 위해 자화 인덕턴스( $L_m$ )를 선형이라 가정하고,  $L = L_1 + L_m$ 이라 하면 등가회로에서 얻어지는 관계식은 식 (1)과 같다.



$i$ : 1차측 전류,  $R$ : 1차측 권선저항  
 $L_1$ : 1차측 누설인덕턴스

그림 1 여자돌입 시 변압기 등가회로(무부하 투입)

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

식(1)에서  $v = V_m \sin(\omega t + \theta)$ 라면, 초기값  $\lambda(T_0)$ 일 때, 자속과 전압의 관계는 식 (2)이다.

$$\lambda(t) = \frac{V_m}{Z_1} \sin(\omega t + \theta - \phi) - \lambda(T_0) \cdot e^{-\frac{t-T_0}{\tau}} \quad (2)$$

여기에서  $\tau = \frac{L}{R}$ ,  $Z_1 = \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \omega^2}$ ,  $\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

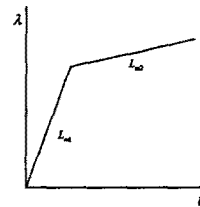


그림 2 구간 선형화 된  $\lambda - i$  곡선

그림 1의 비선형  $L_m$ 을 그림 2와 같이 포화점 이상에서 선형 ( $i = \frac{\lambda}{L_m}$ )이라고 가정하고, 포화점 이후에 대하여 수식을 전개하면 식 (3)과 같다.

$$i(t) = -\frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \theta - \phi) - \left( -\frac{V_m}{Z} \sin(\omega T_0 + \theta - \phi) - i(T_0) \right) \cdot e^{-\frac{(t-T_0)}{\tau}} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}, \quad i(T_0) = \frac{\lambda(T_0)}{L}$$

신호의 차분 적용 특성을 얻기 위하여 식(3)에서 얻어진 연속신호를 이산신호로 변화시키면( $t = nT$ ) 식 (4)이다.

$$i[n] = -\frac{V_m}{Z} \sin\left(\frac{2\pi}{N} n + \theta - \phi\right) - \left( -\frac{V_m}{Z} \sin\left(\frac{2\pi}{N} T_0 + \theta - \phi\right) - i(n_0 T) \right) \cdot e^{-\frac{(n-n_0)T}{\tau}} \quad (4)$$

$\frac{V_M}{Z} = A$ 라 하고, 1차 차분(del1)을 구하면,

$$\begin{aligned} del1[n] &= i[n] - i[n-1] \\ &= A \cdot \left(2\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)\right) \left(\sin\left(\frac{2\pi}{N}\left(n-\frac{1}{2}\right) + \theta - \phi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \\ &\quad - \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right) \left(A \cdot \left(\sin\left(\frac{2\pi}{N}T_0 + \theta - \phi\right) - i(n_0T)\right) \cdot e^{-\frac{(n-n_0)T}{\tau}}\right) \quad (5) \end{aligned}$$

구해진 1차 차분에서 2차 차분(del2)을 구하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} del2[n] &= del1[n] - del1[n-1] \\ &= A \cdot \left(2\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)\right)^2 \left(\sin\left(\frac{2\pi}{N}(n-1) + \theta - \phi + \pi\right)\right) \\ &\quad - \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)^2 \left(A \cdot \left(\sin\left(\frac{2\pi}{N}T_0 + \theta - \phi\right) - i(n_0T)\right) \cdot e^{-\frac{(n-n_0)T}{\tau}}\right) \quad (6) \end{aligned}$$

기본 주파수가 60Hz이고, 주기 당 샘플수가 64샘플일 경우, 차분을 한 번 통과할 때마다 DC는 거의 없어지고, 기본파의 크기(A)는  $0.098A \approx 0.1A$  즉, 1/10로 줄어들게 된다.

1, 2, 3영역의 3부분으로 구성된 다음과 같은 파형에서 차분의 변화를 살펴보면,

- n = 11: 1영역 → 2영역 ( $i_1[11] = i_2[11]$ )
- n = 49: 2영역 → 3영역 ( $i_2[49] = i_3[49]$ )

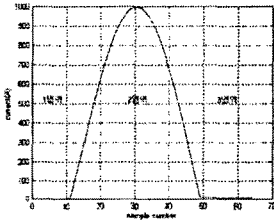


그림 3 입력전류의 파형

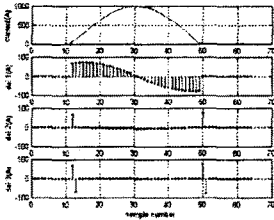


그림 4 입력전류의 차분적용 결과파형

1영역에서 2영역으로 변하는 과정에서 파형의 차분결과는 식(7), (8)과 같다.

$$del1[12] = i_2[12] - i_2[11] \quad (i_1[11] = i_2[11]) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} del2[12] &= i_2[12] - 2i_1[11] + i_1[10] \\ &\approx i_2[12] - i_1[12] \quad (i_1[12] - 2i_1[11] + i_1[10] \approx 0) \quad (8) \end{aligned}$$

위의 결과에서와 같이 입력신호가 연속신호라 할지라도, 파형이 변한다면 del1에서는 불연속적인 신호가 나타나고, del2와 del3에서는 함수의 변화가 일어나는 샘플에서 차이가 나타나며, 이 부분을 제외한 나머지 부분은 기본파의 크기가 주기 당 샘플 수에 맞게 줄어들어 나타난다.

## 2.2 내부사고와 여자돌입의 구분

### 2.2.1 내부사고와 여자돌입 구분알고리즘

제시한 방식은 변압기 여자돌입의 경우에는 차전류 파형의 변화가 여러 번 나타나고, 내부사고의 경우, 사고 순간에만 한 번 나타난다는 데에 착안한다. 차분을 이용한 차전류의 파형 변화를 검출해 냄으로써 내부사고와 여자돌입을 구분한다. 비율전류차동계전기가 동작하더라도, 파형의 변화를 감시하는 del3의 신호가 첫 번째 임계값( $i_{th}$ )을 넘고, CT포화에 의한 차분을 걸러내기 위하여

차전류가 두 번째 임계값( $i_{th2}$ )보다 작으면, 일정시간동안(한 주기) 방지신호를 내보내도록 하는 것이다. 변화가 한 번인 내부사고의 경우에는 변화가 일어나는 순간 방지신호를 내보내다가, 일정시간이 지난 후 방지신호가 없어지므로 Trip이 나가지도록 하고, 변화가 계속 일어나는 여자돌입의 경우에는 변화가 일어날 때마다 방지신호를 내보내도록 하여 trip이 나가지 않도록 하는 것이다. 그림 5는 본 논문의 알고리즘 흐름도이다.

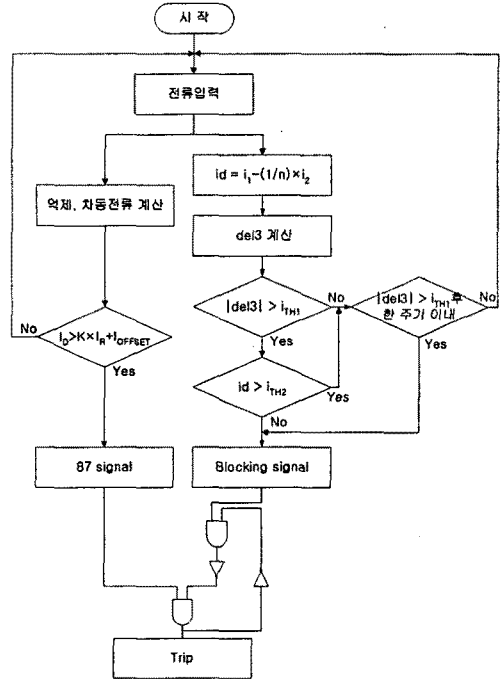


그림 5 알고리즘 흐름도

### 2.2.2 임계값( $i_{th}$ )의 결정

식(2)에서 보는 것과 같이 잔류자속은 DC성분에 포함되어 있으므로, 기본파와 DC성분 중에서 DC성분은 무시할 만큼 작아지고, 기본파는 샘플 수와 몇 번 통과했느냐에 따라 크기가 결정된다.

임계값( $i_{th}$ )은 식(9)와 같이 결정된다.

$$i_{th} = \alpha \cdot \sqrt{2} \left(2\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)\right)^3 \cdot I_{fmax} \quad (9)$$

$\alpha$ : margin,  $N$ : 샘플 수,  $I_{fmax}$ : 최대 내부 사고전류

본 논문에서는  $n=3$ ,  $N=64$ ,  $I_{fmax}=3085[A]$ ,  $\alpha=1.2$ 로 하여  $i_{th} \approx 5[A]$ 를 사용하였다.

## 3. 사례연구

제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 6과 같은 모델계통을 선택하였다. 사용한 변압기는 3상 Y-Y 154/22kV, 55[MVA]이고, 발전기 용량은 6[GVA] 부하용량은 55[MVA] 역률 0.9이다. 변압기 내부사고 모델링은 참고문헌 [4]의 방식을 이용하였다.

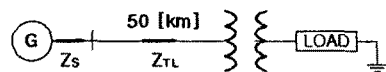


그림 6 모델 계통

사례 그림에서 각 그림의 첫 번째 그림은 차전류를,

두 번째 그림은 del3의 결과를, 세 번째 그림은 87계전기의 출력을 네 번째 그림은 방지신호(Blocking)를, 마지막으로 다섯 번째 그림은 Trip신호를 나타냈다.

### 3.1 여자돌입

그림 7은 무부하 투입, 투입 위상각 0도에서 잔류자속 0%인 경우를 나타냈다.

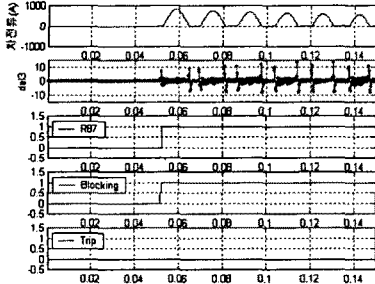


그림 7 여자돌입 파형(잔류자속 80%, A상)

그림 7에서 차전류는 철심의 포화구간과 비포화 구간에서 나타났다가 사라지는 것을 반복하고 있고, del3에서는 이러한 파형의 변화에 따라 변화하는 순간에 값들이 존재하고 그 값이 임계값보다 크면 일정 시간동안 유지되는 방지신호(Blocking) 계속 내보냄으로 87계전기가 동작하더라도 내부사고로 판정하지 않는다.

### 3.2 내부사고

그림 8은 사고 위상각 0도에서 사고권선의 중성점에서 80%지점 지락사고를 나타냈다.

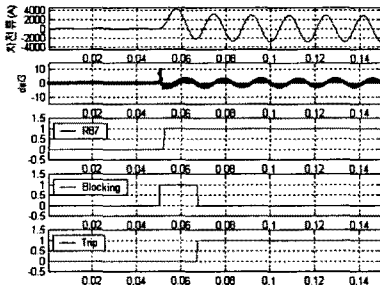


그림 8 내부사고 파형(80% 지락사고, A상)

그림 8에서 사고순간의 변화가 del3에 나타나지만, 한 번만 나타나고 사라지기 때문에 방지신호는 일정시간 동안 유지되다가 사라지고 내부사고로 판정한다.

### 3.3 CT포화

변압기 양단에 CT를 연결하고, CT에서 전류를 입력 받아 알고리즘을 시험해보았다.

그림 9는 무부하 투입, 투입 위상각 0도에서 잔류자속 0%인 경우를 나타낸다. 굵은 선은 1차 전류를 변류비로 나눈 전류이고, 가는 선은 포화된 변류기의 2차 전류이다. 변압기 철심이 포화영역으로 진입하거나, 나오는 순간에 차동전류의 3차차분이 임계값이 넘게 되며, 또한 변류기 포화 시작/종료 순간에는 포화점을 넘게 된다. 차전류가 임계값이하에서 3차 차분이 임계값을 넘게 되는 경우에만, 블러킹 신호를 유효함을 알 수 있다. 따라서, 여자돌입이면서 변류기가 포화된 경우에 전류차동 계전기는 동작함에도, 제시한 방식이 이를 억제하여, 동작하지 않게 된다.

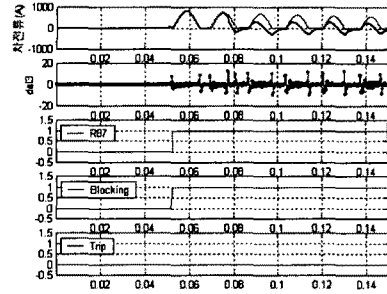


그림 9 여자돌입 파형(잔류자속 80%, A상)

그림 10은 사고 위상각 0도에서 사고권선의 중성점에서 80%지점 지락사고인 경우를 나타낸다. 이 경우에도, 사고 발생 순간에 3차 차분이 임계값을 초과하고, 변류기가 포화 개시/종료 순간에 임계값을 초과하지만, 제시한 방식이 이를 내부사고로 구분함을 알 수 있다.

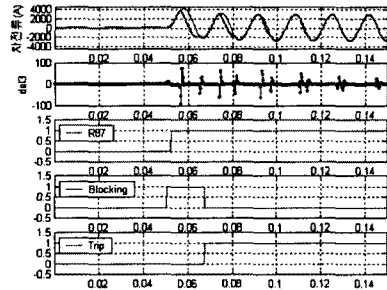


그림 10 내부사고 파형(80% 지락사고, A상)

## 4. 결 론

본 논문에서는 변압기 차전류의 3차 차분을 이용한 전류차동 계전 알고리즘을 제시하였다. 제시한 방식은 내부사고와 여자돌입을 잘 구분하는 것을 확인하였으며, CT 포화 시에도 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 제시한 방식은 변류기 포화에 대한 별도의 대책이 필요 없으며, 여자돌입의 경우에도 이를 잘 구분하므로, 감도가 좋은 비율 전류 차동 계전기의 사용이 가능하다.

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

### (참 고 문 헌)

- [1] A. R. Bergen, "Power System Analysis", Prentice Hall, 2000
- [2] J. L. Blackburn, "Protective Relaying", Marcel Dekker, 1998
- [3] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, H.J. Altuve "A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection-Part I: Problem Statement", IEEE Trans. on PWRD, vol.16, no.4, pp. 485-491, October 2001
- [4] P. Bastard, P. Bertand, M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PWRD, vol.9, no.2, pp. 690-699, April 1994