

## Modified Current Differential Relay for Transformer Protection Unaffected by Remanent flux

姜龍澈<sup>†</sup> · 金恩淑<sup>\*</sup>  
(Yong-Cheol Kang · En-Shu Jin)

**Abstract** - This paper proposes a modified current differential relay for transformer protection unaffected by the remanent flux. The relay uses the same restraining current as a conventional relay, but the differential current is modified to compensate for the effects of the exciting current. To cope with the remanent flux, before saturation, the relay calculates the core-loss current and uses it to modify the measured differential current. When the core then enters saturation, the initial value of the flux is obtained by inserting the modified differential current at the start of saturation into the magnetization curve. Thereafter, the actual core flux is then derived and used in conjunction with the magnetization curve to calculate the magnetizing current. A modified differential current is then derived that compensates for the core-loss and magnetizing currents. The performance of the proposed differential relay was compared against a conventional differential relay. Results indicate that the modified relay remained stable during severe magnetic inrush and over-excitation because the exciting current was successfully compensated. This paper concludes by implementing the relay on a hardware platform based on a digital signal processor. The relay discriminates magnetic inrush and over-excitation from an internal fault and is not affected by the level of remanent flux.

**Key Words** : Current Differential Relay, Remanent Flux, Magnetizing Current, Core-loss Current, Magnetic Inrush, Over-Excitation

### 1. 서 론

변압기 보호 계전기는 내부사고를 여자돌입 및 과여자 등과 정확하게 구분할 수 있어야 하고, 변압기 보호에는 전류차동 계전기가 널리 이용되어 왔다. 하지만, 이 방식은 여자돌입 또는 과여자시에 오동작 할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 전류, 전압 또는 자속을 기반으로 하여 계전기의 출력을 억제 또는 블로킹하는 방식을 사용하고 있다[1].

이 중에서 전류를 이용하여 억제 또는 블로킹하는 방식이 주로 사용되고 있으며, 2조파와 5조파를 이용하여 억제 또는 블로킹 신호를 만드는 방식이 제안되었다[2]. 이 방식은 대부분의 여자돌입이나 과여자시에 오동작을 방지할 수 있지만, 내부사고시에 계전기의 동작시간이 증가하는 단점이 있다.

자속을 이용한 블로킹 방식은 여자돌입시에는 계산된 자화전류와 자속의 궤적이 자화곡선을 따르는 반면에, 내부사고시에는 기울기가 작은 직선을 따른다는 원리를 이용하였다[3]. 하지만, 잔류자속이 존재하는 경우에는 자화전류와 자속의 궤적이 자화곡선에서 벗어나게 된다. 따라서 자화전류 변화량에 대한 자속 변화량의 비율 즉, 자화곡선의 기울기를 구하여 적용하였다. 기울기가 크면 카운터를 감소시키고, 기울기가 작으면 카운터를 증가시킨다. 또한, 카운터가 임계값을 초과

하면 트립신호를 발생시킨다[3]. 하지만, 이 방식은 부하가 연결된 경우의 여자돌입과 과여자의 경우에는 1차 전류와 차전류가 같지 않으므로 적용하기 어려운 문제가 있다.

전류차동 계전기의 단점을 극복하고자 변압기 모델에 기초한 보호 방식이 제안되었다[4, 5]. 이 방식들은 전압과 전류의 페이저를 계산하지 않고 시간영역에서 동작하기 때문에 속도가 매우 빠르다. 하지만 이 방식들은 변압기 양단의 전류와 양단의 전압이 필요하다.

전류차동 계전기는 전력 설비에 유입되는 전류와 유출되는 전류의 차이를 고려하여 설비를 보호하는 방식이다. 하지만 유·출입 전류만을 고려하는 변압기 보호용 전류차동 계전기는 여자돌입이나 과여자시에 매우 증가하는 자화전류를 고려할 수 없기 때문에 오동작한다. 따라서 오동작을 방지하기 위한 별도의 억제 또는 블로킹 방식이 필요하다. 이러한 전류차동 계전기의 단점을 극복하고자 1차, 2차 전류뿐만 아니라, 철손전류와 자화전류를 고려한 차전류를 구하여 보호하는 수정전류차동 계전기가 제안되었다[6]. 이 방식은 여자돌입이나 과여자시에 큰 값을 갖는 자화전류와 철손전류를 보상하여 보호한다. 또한 이 방식은 별도의 억제 또는 블로킹 방식이 필요하지 않기 때문에 내부사고시 동작속도가 빠르다. 하지만, 이 방식은 잔류자속이 있는 경우에는 정확한 자속을 계산하기 어려운 문제가 있다.

본 논문에서는 잔류자속에 무관한 변압기 보호용 수정전류차동 계전방식을 제안한다. 제안한 방식은 [6]에서와 마찬가지로 철손전류, 자화전류를 보상한다. 하지만 잔류자속의 문제를 해결하기 위하여, 철심의 포화 이전과 포화 이후로 나누어서 각각 다른 형태의 수정된 차전류를 계산한다. 포화 이

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 全北大 電子情報工學部 助教授 · 工博  
E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 全北大 電氣工學科 博士課程  
接受日字 : 2004年 5月 4日  
最終完了 : 2004年 8月 11日

전에는 자화전류가 무시할 만큼 작기 때문에 철손전류만을 구하여 수정된 차전류를 계산한다. 한편, 차전류가 임계값을 초과하면 철심이 포화되었다고 판단하고, 그 순간의 차전류(자화전류)를 자화곡선에 대입하여, 자속을 구한다. 이 값을 자속 계산을 위한 초기자속으로 사용한다. 포화 이후에는 초기자속으로부터 매 순간의 자속을 구하고, 이 값을 자화곡선에 대입하여 자화전류를 추정한다. 이와 같이 수정된 차전류를 구하여 사고를 판단하는 방식이다. EMTP를 이용하여 변압기를 모델링한 후, 다양한 조건에서의 여자돌입, 내부사고, 과여자, 외부사고 데이터를 생성한 후에, 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식의 성능을 비교하였다. 또한, 제안한 방식을 DSP 보드를 이용하여 실시간 시험하였고, 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻었다.

**2. 잔류자속에 무관한 변압기 보호용 수정전류차동 계전방식**

그림 1에 3상 Y-Y 변압기와 이의 한 상의 등가회로를 나타내었다.

**2.1 기존 전류차동 계전방식**

기존의 전류차동 계전방식은 식 (1)과 같이 차전류 기본파의 크기  $I_d$ 를 구한다.

$$I_d = |\vec{I}_1 - a\vec{I}_2| \tag{1}$$

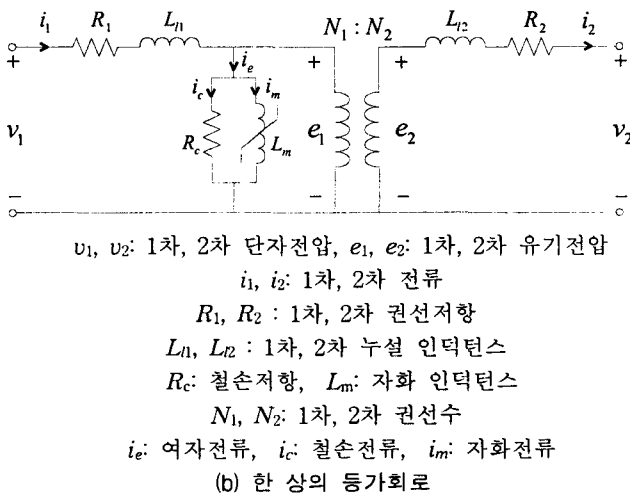
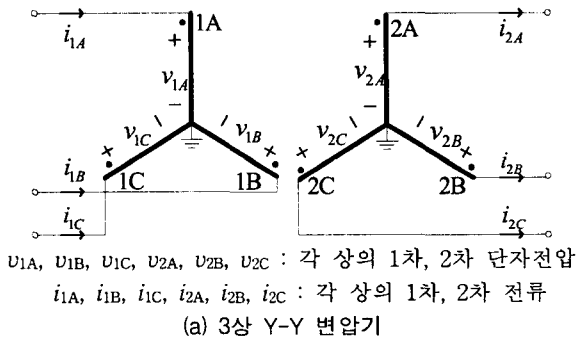


그림 1 3상 Y-Y 변압기와 한 상의 변압기 등가회로  
 Fig. 1 Two-winding three phase transformer and its per phase equivalent circuit

여기서  $\vec{I}_1, \vec{I}_2$ 는 각각 1차, 2차 전류의 기본파의 페이저이며,  $a = N_2/N_1$ 이다. 또한, 역제전류의 기본파 성분  $I_r$ 은 식 (2)와 같이 계산한다.

$$I_r = \frac{|\vec{I}_1 + a\vec{I}_2|}{2} \tag{2}$$

또한, 전류차동 계전기의 동작 특성은 식 (3)과 같다.

$$I_d \geq I_{offset} + KI_r, \quad I_{offset} = 15 A \tag{3}$$

계전기의 감도  $K$ 는 본 논문에서는 0.3으로 설정하였다.

**2.2 잔류자속에 무관한 전류차동 계전방식**

참고문헌 [6]에서는 초기자속을 0이라고 놓고 변압기의 투입 순간부터 자속을 계산하고, 자화전류를 추정하여 수정된 차전류를 구하여 변압기를 보호한다. 하지만, 잔류자속이 존재하면 이 방식은 정확한 자속을 계산하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 철심의 포화 이전과 포화 이후로 나누어서 각각 다른 형태의 수정된 차전류를 구한다 즉, 제안한 방식은 철심의 포화 이전에는 자속을 계산하지 않고 철손전류만을 구하여 보상한다. 반면, 차전류가 임계값을 초과하게 되면 즉, 철심의 포화 이후에는 자화전류와 철손전류 모두를 구하여 수정된 차전류를 계산하도록 하였다. 제안한 방식의 흐름도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 sat\_ind는 변압기 철심의 포화유무를 판단하는 플래그로서, 철심이 포화된 경우에는 sat\_ind = 1, 포화되지 않은 경우에는 sat\_ind = 0으로 플래그를 설정하여 알고리즘을 수행하였다.

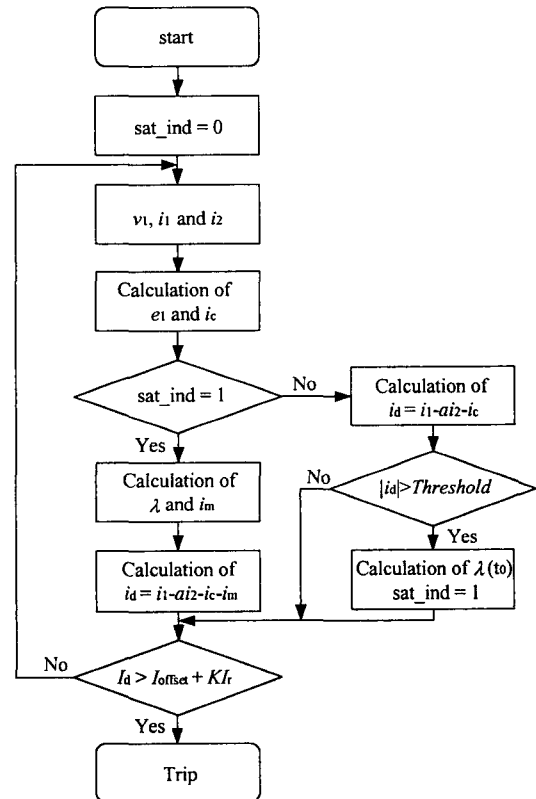


그림 2 제안한 방식의 흐름도  
 Fig. 2 Flow chart of the proposed relay

2.2.1 철심의 포화 이전 (sat\_ind = 0)

철심의 포화 이전(그림 2의 sat\_ind = 0)에는 철손전류  $i_c(t)$ 만을 추정하여 수정된 차전류를 구한다.  $i_c(t)$ 는 그림 1의 등가회로에서  $R_c$ 에 흐르는 전류이다.  $R_c$ 는 제작자에 의해서 주어지므로,  $e_1(t)$ 을 알면  $i_c(t)$ 를 계산할 수 있다.  $e_1(t)$ 에 대해 정리하면 식 (4)가 된다[6].

$$e_1(t) = v_1(t) - R_1 i_1(t) - L_n \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4)$$

$i_c(t)$ 는 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$i_c(t) = \frac{e_1(t)}{R_c} \quad (5)$$

따라서, 포화 이전에는 식 (6)의 수정된 차전류  $i_d(t)$ 를 구하고, 이의 기본파 성분을 구한다.

$$i_d(t) = i_1(t) - a i_2(t) - i_c(t) \quad (6)$$

2.2.2 철심의 포화 이후 (sat\_ind = 1)

포화 이전에는 자화전류가 크지 않으므로 식 (6)의  $i_d(t)$ 는 아주 작지만, 철심이 포화되면 이 값이 매우 커진다. 본 논문에서는  $i_d(t)$ 가 임계값을 초과하면 포화시작이라고 판단한다. 이를 위한 임계값은 포화점 전류값보다 크게 선택하면 된다.

포화시작 순간에서의  $i_d(t)$ 는 자화전류로 간주할 수 있기 때문에, 그 순간의  $i_d(t)$ 를 자화곡선에 대입하면 포화순간의 자속을 구할 수 있다(그림 3). 이 자속을  $\lambda(t_0)$ 로 하면, 포화 이후 자속  $\lambda(t)$ 는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\lambda(t) = \int_0^t e_1(t) dt + \lambda(t_0) \quad (7)$$

$\lambda(t)$ 를 자화곡선에 대입하여, 그 자속에 해당하는 자화전류  $i_m(t)$ 를 추정한다.

한편, 포화 이후에도 식 (5)를 이용하여 철손전류를 구한다. 따라서, 포화 이후에는 식 (8)의 수정된 차전류를 구한다.

$$i_d(t) = i_1(t) - a i_2(t) - i_c(t) - i_m(t) \quad (8)$$

포화 이후에는 식 (8)을 이용해서 구한 수정된 차전류의 기본파 성분과 식 (2)의 역제전류가 식 (3)의 트립 조건을 만족하면 사고라고 판단한다.

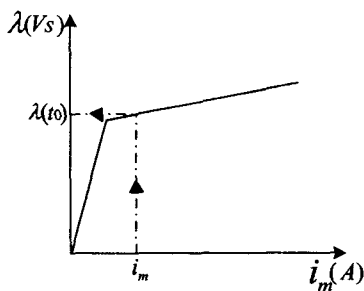


그림 3  $\lambda(t_0)$ 의 추정  
Fig. 3 Estimation of  $\lambda(t_0)$

3. 사례연구

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 모델 계통을 선택하였다. 3상 Y-Y 변압기(154kV/22kV, 55 MVA)를 EMTP를 이용하여 모델링하였고, 샘플링 비율은 주기당 64샘플을 사용하였다. 내부사고는 참고문헌 [7]의 방식을 이용하여 모델링하였다.

변압기 철심의 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 type-96소자를 사용하였고, HYSDAT를 이용하기 위한 포화점은 (40A, 333.754Vs)를 사용하였다. 저역 통과필터는 저지대역 컷오프 주파수를 1920 Hz인 Butterworth 2차 필터를 설계하여 전압과 전류를 통과시켰다. 포화를 판단하기 위한 임계값은 포화점 전류의 두 배 즉, 80A를 선택하였다.

사례연구에서의 결과는 A상의 경우만 나타내었다. 여자돌입, 내부사고, 과여자, 외부사고 등의 경우에 대하여 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식의 성능을 비교하였다.

3.1 여자돌입

여자전류의 크기는 투입 위상각, 잔류자속, 부하에 따라 달라지므로, 세 가지 파라미터를 변경하여 다양한 여자돌입의 경우를 모의하였다.

1) 사례 1: 투입 위상각 0도, 잔류자속 0%, 무부하

그림 5는 사례 1에 대한 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 변압기가 29.2ms에 투입되었다. 그림 5e에서 점선은 기존 방식의 트립신호를 나타내고, 실선은 제안한 방식의 트립신호를 나타낸다. 투입 위상각이 0도이기 때문에 철심이 심하게 포화되었다. 기존 방식의 경우의 차전류는 펄스 모양이 되고, 첫 번째 펄스의 크기는 약 1000A이 되었다(그림 5b). 기존 계전기는 34.4 ms(투입 후 5.2ms)에 동작영역 안으로 진입하여(그림 5d), 트립신호가 발생되었다(그림 5e).

한편, 제안한 방식은 33.9ms에 포화시작순간을 검출하고, 이 순간에 계산된 초기자속은 345.4Vs이다. 식 (7)을 이용하여 계산된  $\lambda(t)$ 를 자화곡선에 대입하므로써 자화전류  $i_m(t)$ 를 추정하였다(그림 5c). 기존의 차전류에서  $i_c(t)$ 와  $i_m(t)$ 를 빼서 수정된 차전류의 값이 매우 작기 때문에, 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않았으며(그림 5d), 트립신호가 발생되지 않았다(그림 5e).

2) 사례 2: 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%, 무부하

그림 6은 사례 2에 대한 기존 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 이 경우에는 차전류의 피크값이 1800A가 되었고, 32.3 ms(투입 후 3.1ms)에 기존 계전기가 동작영역에 진입하였다. 한편, 제안한 방식에서는 31.5ms에 포화시작순간을 검출하여, 수정된 차전류를 계산하였다. 수정된 차전류의 값이 매우 작기 때문에, 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않아서 트립신호가 발생되지 않았다.

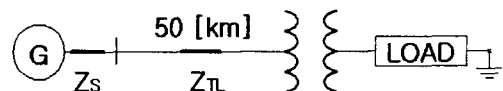
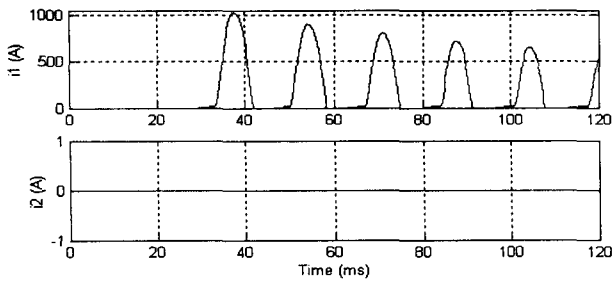
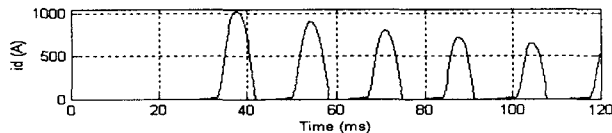


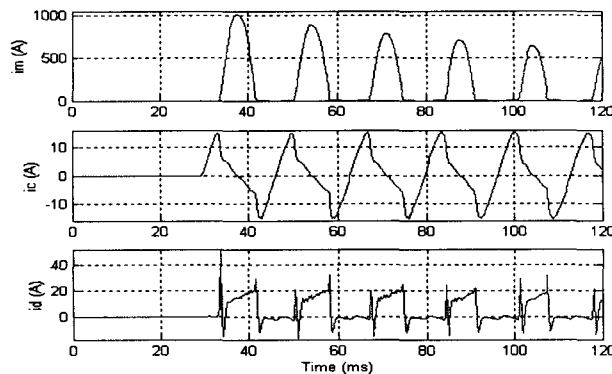
그림 4 모델 시스템  
Fig. 4 Model system studied



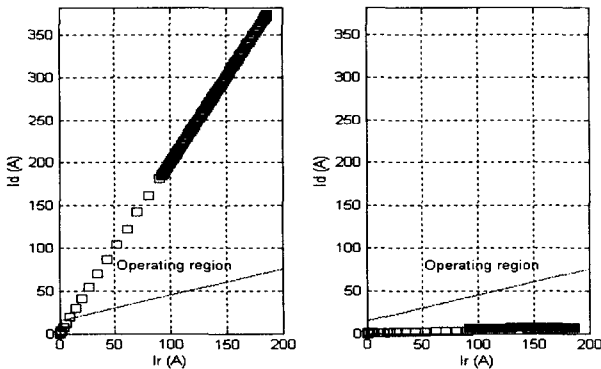
(a) 1차 전류와 2차 전류의 순시값



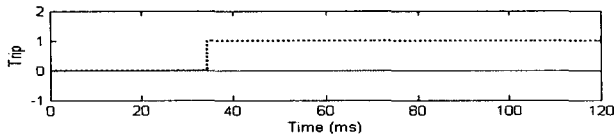
(b) 차전류 (기존의 방식)



(c) 자화, 철손, 차전류 (제안한 방식)



(d) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작



(e) 트립신호

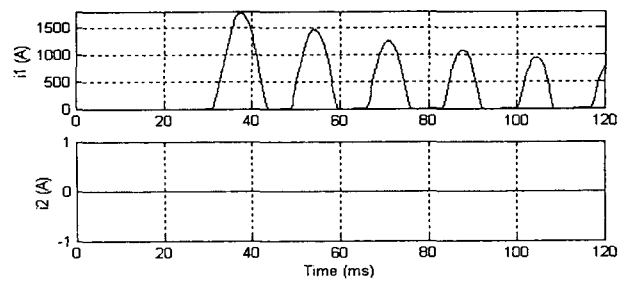
그림 5 사례 1의 결과  
Fig. 5 Results for Case 1

3.2 내부사고

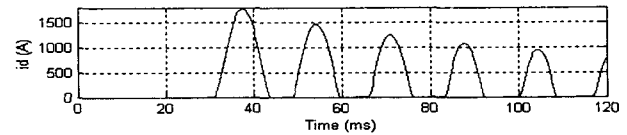
1차 권선의 A상에 다양한 내부사고를 모의하여 제안한 방식을 시험하였다.

1) 사례 3: 중성점으로부터 80% 지점의 0도 지락사고

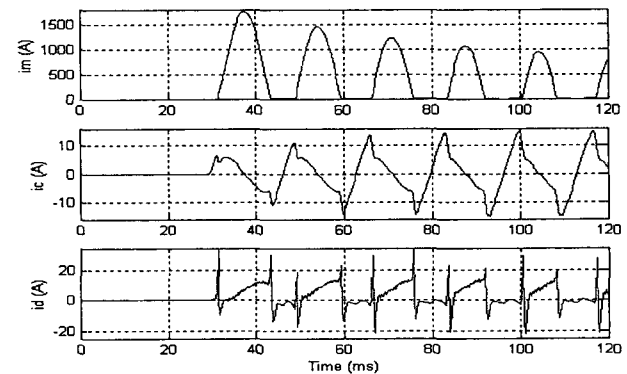
그림 7은 사례 3에 대한 기존의 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. A상에서 지락사고가 29.2ms에 발생되었다.



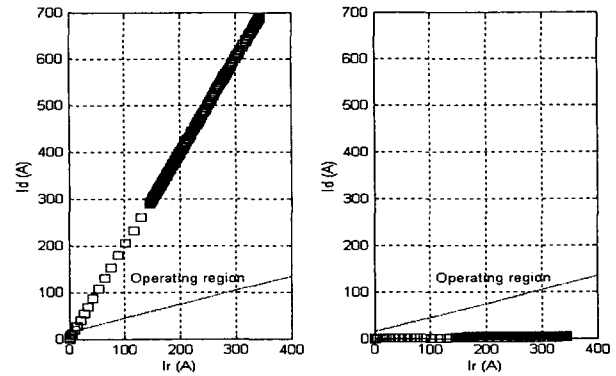
(a) 1차 전류와 2차 전류의 순시값



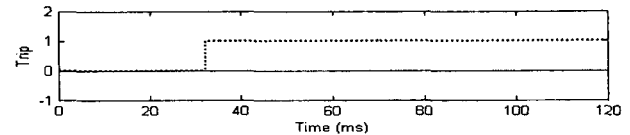
(b) 차전류 (기존의 방식)



(c) 자화, 철손, 차전류 (제안한 방식)



(d) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작

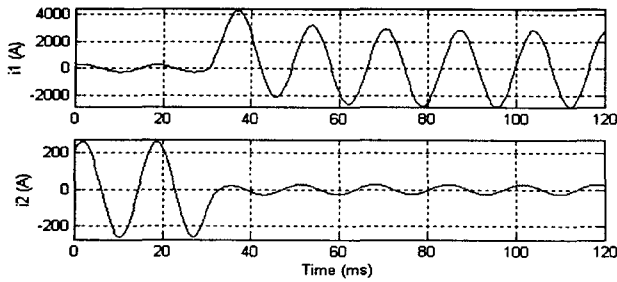


(e) 트립신호

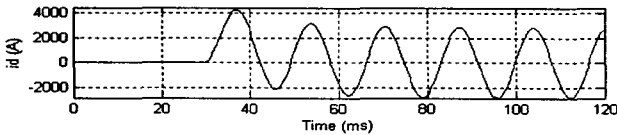
그림 6 사례 2의 결과  
Fig. 6 Results for Case 2

기존 방식은 32 ms(사고 발생 후 2.8 ms)에 동작영역 안으로 진입하게 되어, 트립신호가 발생되었다.

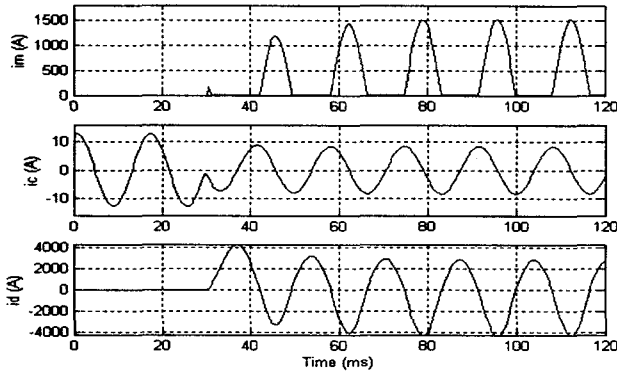
한편, 제안한 방식은 30.5ms에 포화시작순간을 검출하였고, 32 ms(사고 발생 후 2.8 ms)에 트립신호가 발생되었으며(그림 7e), 동작속도가 기존 방식과 같음을 알 수 있다.



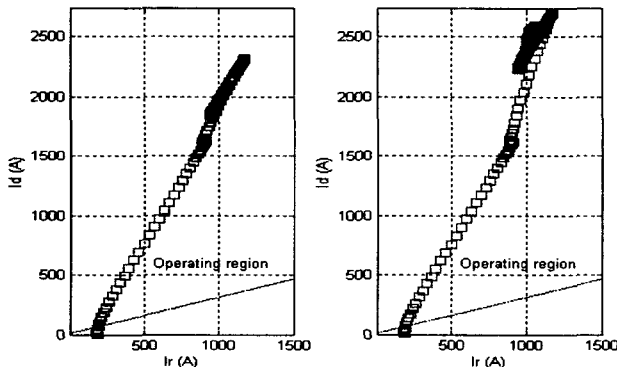
(a) 1차 전류와 2차 전류의 순시값



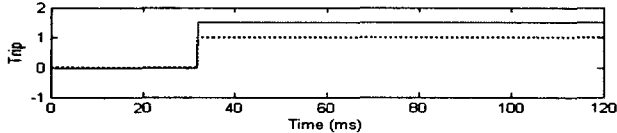
(b) 차전류 (기존의 방식)



(c) 자화, 철손, 차전류 (제안한 방식)



(d) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작



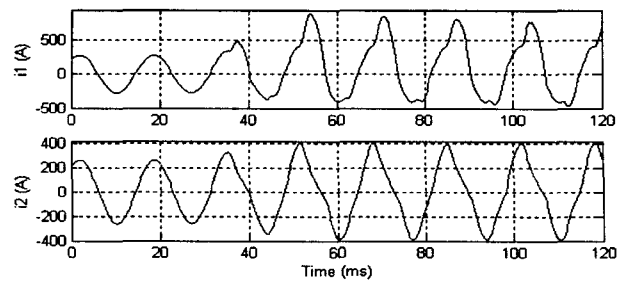
(e) 트립신호

그림 7 사례 3의 결과  
Fig. 7 Results for Case 3

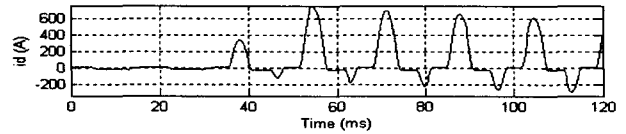
3.3 과여자

1) 사례 4: 1차 정격전압의 15배의 전압을 인가

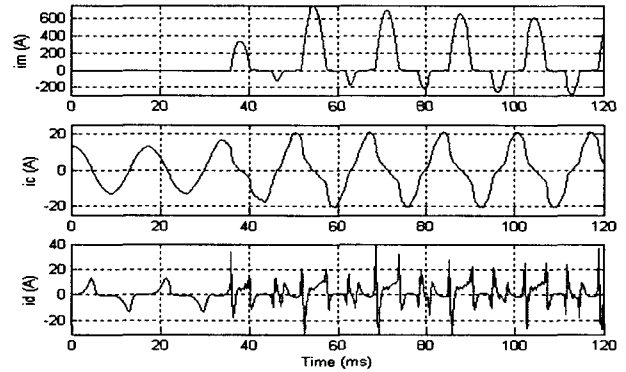
그림 8은 사례 4에 대한 기존의 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 15배의 과전압이 29.2 ms에 인가되어, 그 이후에 1차 전류와 2차 전류가 심하게 왜곡되었고, 차전류가 접



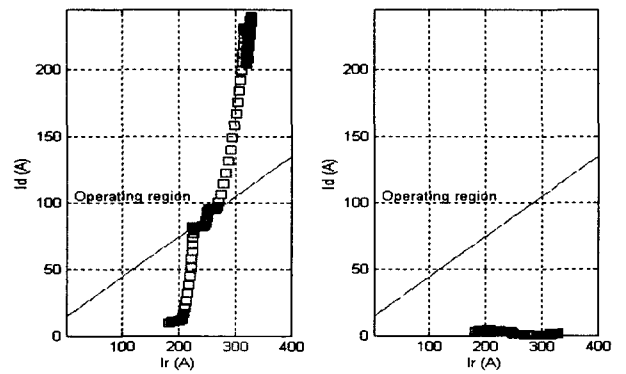
(a) 1차 전류와 2차 전류의 순시값



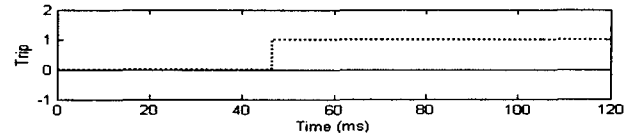
(b) 차전류 (기존의 방식)



(c) 자화, 철손, 차전류 (제안한 방식)



(d) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작



(e) 트립신호

그림 8 사례 4의 결과  
Fig. 8 Results for Case 4

차 커짐을 알 수 있다. 따라서, 기존 방식의 경우, 계전기가 46.6ms에 동작영역 안으로 진입하여, 트립신호가 발생되었다. 한편, 제안한 방식에서는 수정된 차전류가 아주 작기 때문에 (그림 8c) 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않았으며, 트립신호가 발생되지 않았다.

3.4 외부사고

1) 사례 5: 변압기 2차측 부하 0도 A상 지락사고

그림 9는 사례 5에 대한 기존의 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 사고는 29.2 ms에 발생되었다. 사고 후, 변압기의 약한 포화로 인하여,  $i_d(t)$ 가 증가한다. 하지만, 60Hz인 기본파 성분만 계산하였기 때문에 기존 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않았다. 한편, 제안한 방식에서 수정된 차전류는 아주 작기 때문에 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않았으며, 트립신호가 발생되지 않았다.

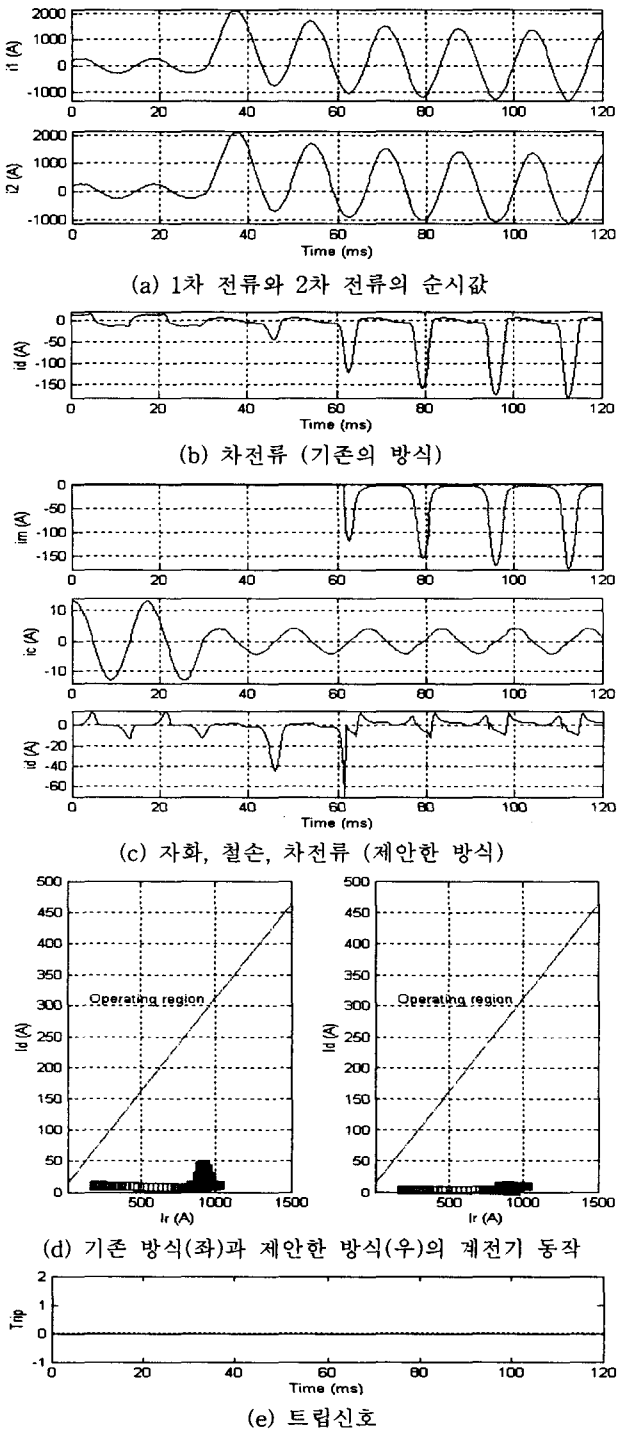


그림 9 사례 5의 결과  
Fig. 9 Results for Case 5

잔류자속에 무관한 변압기 보호용 수정전류차동 계전기

4. 실시간 시험

제안한 방식을 실시간으로 시험하기 위하여 그림 10의 시험 시스템을 사용하였다. PCL-727 D/A 변환기를 이용하여 EMTP에서 얻은 9개의 데이터를 아날로그 데이터로 변환한 후, 차단주파수가 1920 Hz인 2차 Butterworth 저역통과 필터를 통과시킨 뒤 AI 카드에 입력하였다. AI 카드에서 이를 디지털 값으로 변환하여 TMS320C6701 DSP로 전달하고, DSP에서 주기당 64샘플의 속도로 제안한 알고리즘을 수행하였다. 그림 11과 12는 각각 사례 2와 사례 3에 대한 실시간 시험 결과를 나타내며, 시뮬레이션 결과와 거의 유사한 결과를 얻었다(그림 6, 7).

5. 결론

본 논문에서는 잔류자속에 무관한 변압기 보호용 수정전류차동 계전방식을 제안하였다. 제안한 방식은 포화 이전에는 철손전류만을 고려하여 수정된 차전류를 계산하였고, 포화 이후에는 철손전류와 자화전류를 고려하여 수정된 차전류를 구하였다. 여자돌입, 내부사고, 과여자, 외부사고 등의 경우에 대하여 제안한 방식의 성능을 검증한 결과, 수정된 차전류가 아주 작기 때문에, 내부사고를 여자돌입, 과여자, 외부사고와 정확하게 구분하였다. 또한, 제안한 방식을 실시간 시험한 결과, 시뮬레이션 결과와 거의 같은 결과를 얻었다.

제안한 방식은 잔류자속과 관계없이 정확하게 동작할 수 있을 뿐만 아니라, 블로킹 혹은 역제신호가 필요하지 않기 때문에 기존 전류차동 계전기의 동작속도를 향상할 수 있다.

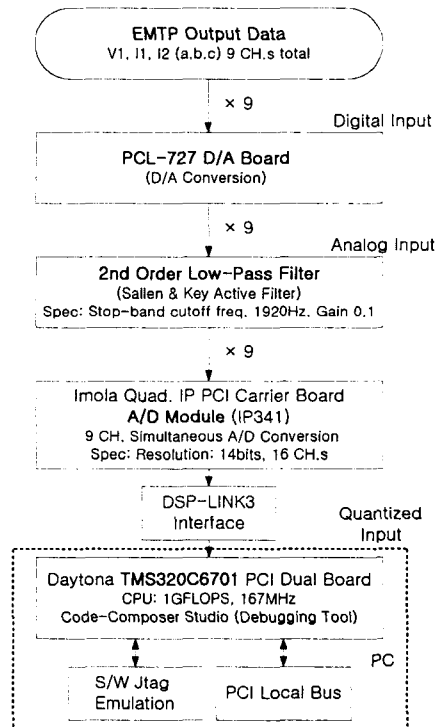
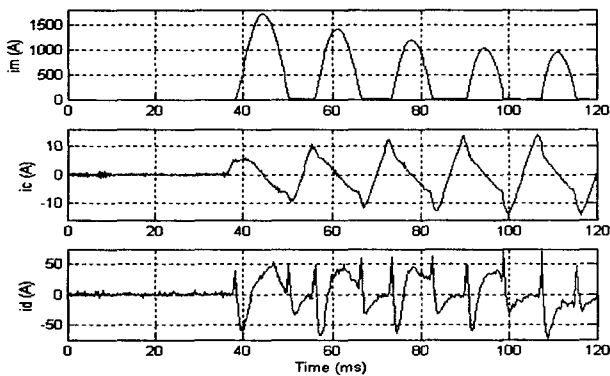
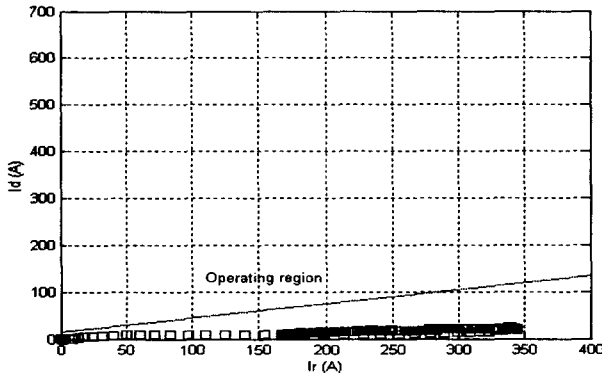


그림 10 실시간 시험 시스템  
Fig. 10 Real time testing system



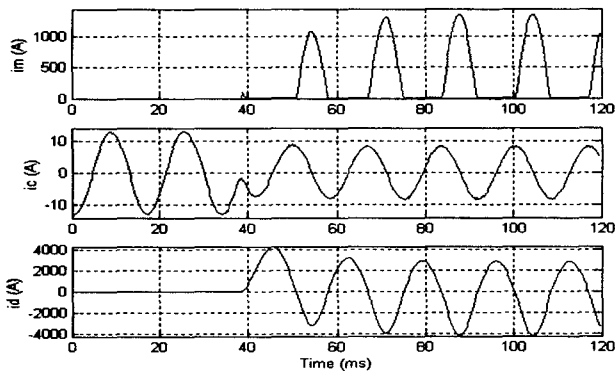
(a) 자화, 철손, 차전류 (제안한 방식)



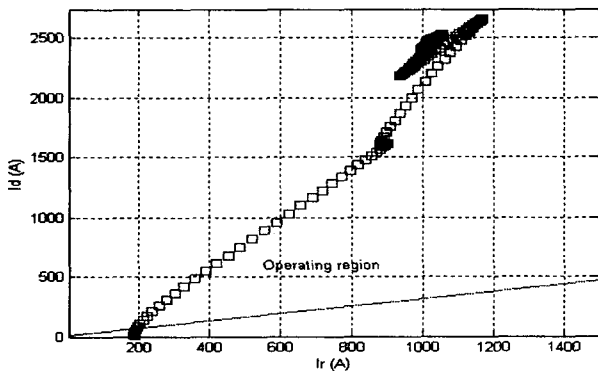
(b) 제안한 방식의 계전기 동작

그림 11 사례 2의 실시간 시험 결과

Fig. 11 Hardware implementation results for Case 2



(a) 자화, 철손, 차전류(제안한 방식)



(b) 제안한 방식의 계전기 동작

그림 12 사례 3의 실시간 시험 결과

Fig. 12 Hardware implementation results for Case 3

참 고 문 헌

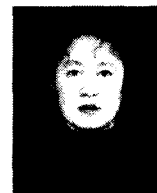
- [1] A. G. Phadke, and J. S. Throp, Computer Relaying for Power Systems, Research Studies Press LTD., 1988.
- [2] C. H. Einvall, and J. R. Linders, "A Three-phase Differential Relay for Transformer Protection," IEEE Trans. on PAS, vol. 94, no. 6, pp. 1971-1980, Nov./Dec. 1975.
- [3] A. G. Phadke, and J. S. Thorp, "A New Computer-based Flux-Restrained Current-Differential Relay for Power Transformer Protection," IEEE Trans. on PAS, vol. 102, no. 11, pp. 3624-3629, Nov. 1983.
- [4] M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, and H. C. Wood, "A Digital Relaying Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults," IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, no. 3, pp. 1638-1648, Jul. 1989.
- [5] Y. C. Kang, B. E. Lee, S. H. Kang, S. S. Kim, and 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.
- [6] 강용철, 김은숙, 원성호, "변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식," 전기학회 논문지 A, 제53권 제2호, 2004년2월, pp. 80-86.
- [7] P. Bastard, P. Bertrand, and M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies," IEEE Trans. on PWRD, vol. 9, no. 2, pp. 690-699, Apr. 1994.

저 자 소 개



강용철 (姜龍撤)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재, 전북대 공대 전자정보공학부 조교수. 차세대전력기술연구소  
 Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394  
 E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr



김은숙 (金恩淑)

1972년 2월 22일생. 1994년 중국 동북전력학원 전기공학과 졸업, 1999년 중국 동북전력학원 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전북대 공대 전기공학과 박사과정  
 E-mail : jes222kr@yahoo.co.kr