

변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식

A Modified Current Differential Relay for Transformer Protection

姜 龍 澈* · 金 恩 淑** · 元 成 浩***

(Yong-Cheol Kang · En-Shu Jin · Sung-Ho Won)

Abstract - During magnetic inrush or over-excitation, saturation of the core in a transformer draws a large exciting current, which can cause mal-operation of a differential relay. This paper proposes a modified current differential relay for transformer protection. The relay calculates core-loss current from the induced voltage and the core-loss resistance the relay calculates the magnetizing current from the core flux and the magnetization curve. Finally, the relay obtain the modified differential current by subtracting the core-loss and the magnetizing currents from the conventional differential current. Comparison study with the conventional differential relay with harmonic blocking is also shown. The proposed technique not only discriminates magnetic inrush and over-excitation from an internal fault, but also improve the speed of the conventional relay.

Key Words: Magnetizing current, Core-loss current, Magnetic inrush, Overexcitation, Harmonic blocking

1. 서 론

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

전류를 이용하여 억제 또는 블로킹하는 방식은 두 가지 즉, 고조파 방식[2-5]과 파형 판별법[6, 7]으로 나뉜다. 참고문헌 [2]와 [3]에서는 모든 고조파 성분을 억제용으로 사용하였다. 참고문헌 [4]에서는 2조파를 이용하여 계전기 출력을 블로킹하는 방식을 처음으로 도입하였으며, 참고문헌 [5]에서는 2조파와 5조파를 결합하여 억제 또는 블로킹 신호를 만드는 방식을 제안하였다. 이러한 고조파를 이용하는 억제 및 블로킹 방식은 여자돌입이나 과여자시에 오동작을 어느 정도 방지할 수 있지만, 차전류에 고조파 성분이 적은 경우에는 오동작하고, 내부사고시에 동작이 지연된다.

파형 판별을 이용한 블로킹 방식의 경우에는, 참고문헌 [6]에서는 차전류의 연속적인 피크 값이 7.5-10ms안에 발생하지 않으면 계전기의 출력을 블로킹한다. 또한 참고문헌 [7]에서는 차전류의 크기가 거의 0인 구간의 시간을 이용해서 계전기를 블로킹한다. 여자돌입의 경우에는 차전류가 거의 0인 저전류 구간이 4분의 1주기보다 크므로 계전기를 블로킹하고,

내부사고의 경우에는 저전류 구간이 4분의 1주기를 넘지 않으므로 계전기는 동작한다. 하지만, 파형 판별을 이용한 방식은 과여자는 구분할 수 없다.

전압을 이용한 블로킹 방식의 경우에는, 전압이 높은 값이면 계전기를 블로킹한다[8]. 하지만 이 방식은 고조파를 이용하는 방식에 비해 속도가 늦다.

자속을 이용한 블로킹 방식은 자속 증분의 1차 전류 증분에 대한 비를 구해서, 그 값이 작은 구간과 큰 구간을 반복하게 되면 계전기의 출력을 블로킹한다[9]. 하지만 이 방식은 부하가 연결된 경우의 여자돌입과 과여자의 경우에는, 1차 전류와 차전류가 같지 않으므로 블로킹할 수 없다.

이러한 전류차동 계전기의 단점을 극복하고자, 변압기 5델에 기초한 변압기 보호 방식이 제안되었다[10-12]. 참고문헌 [10]에서는 변압기의 비선형 파라미터를 이용하였으며, 참고문헌 [11, 12]에서는 선형파라미터를 이용하였다. 이 방식들은 변압기 양단의 전류와 양단의 전압이 필요하다.

여자돌입이란 철심의 비선형 특성에 기인한 것으로, 변압기 투입 시 철심의 한쪽 방향으로, 포화와 비포화를 반복하는 현상이다. 한편, 과여자란 과전압 또는 저주파수 운전으로 인해 철심의 양쪽 방향으로, 포화와 비포화를 반복하는 현상이다. 두 현상 모두 차전류가 임계값 이상으로 존재하여 전류차동 계전기의 오동작을 유발한다.

본 논문에서는 변압기 철심의 비선형 자화특성을 고려한 변압기 보호용 수정된 전류차동 계전방식을 제안한다. 제안한 방식은 철손저항과 유기전압을 이용하여 철손전류를 계산한다. 또한, 자화곡선과 자속으로부터 자화전류를 계산한다 그 다음에 1차 전류에서 자화전류, 철손전류, 2차 전류를 뺀 차전류를 구하여, 내부사고를 판단한다. EMTP를 이용하여 변압기를 모델링한 후, 다양한 조건에서의 여자돌입, 내부사고, 과여자 데이터를 생성한 후에, 기존의 고조파 블로킹 방식과 비교하여 제안한 방식의 성능을 검증하였다.

* 正 會 員 : 全 北 大 電 子 情 報 工 學 部 助 教 授 · 工 博

** 正 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

*** 準 會 員 : 全 北 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

接 受 日 字 : 2003年 6月 23日

最 終 完 了 : 2003年 11月 25日

2. 변압기 보호용 수정된 전류차동 계전방식

그림 1에 3상 Y-Y 변압기를 나타내며, 이의 한 상의 등가 회로를 그림 2에 나타내었다. 본 논문에서는 그림 2의 등가 회로에서 R_c, R_1, L_{11} 는 알 수 있다고 가정하였다.

2.1 고조파 블로킹 전류차동 계전방식

본 절에서는 제안한 방식과 비교할 기존의 고조파 블로킹 전류차동 계전방식을 기술한다. 기존방식은 식 (1)과 같이 차전류 기본파의 크기 I_d 를 구한다.

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

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.

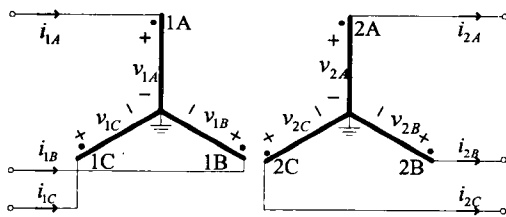
$$I_d \geq I_{offset} + KI_r, \quad I_{offset} = 15A \tag{3}$$

계전기의 감도 K 는 본 논문에서는 0.3으로 설정하였다.

자돌입과 과여자시의 오동작을 방지하기 위하여 식 (4) 또는 식 (5)의 조건을 만족하면 계전기의 출력을 블로킹하도록 하였고, 이의 구성을 그림 3에 나타내었다.

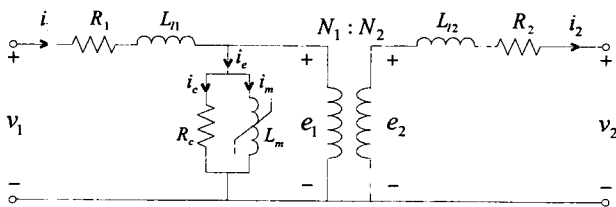
$$I_d < K_2 I_2 \tag{4}$$

$$I_d < K_5 I_5 \tag{5}$$



$v_{1A}, v_{1B}, v_{1C}, v_{2A}, v_{2B}, v_{2C}$: 각 상의 1차, 2차 단자전압
 $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}, i_{2A}, i_{2B}, i_{2C}$: 각 상의 1차, 2차 전류

그림 1 3상 Y-Y 변압기
 Fig. 1 A three-phase Y-Y transformer



v_1, v_2 : 1차, 2차 단자전압, e_1, e_2 : 1차, 2차 유기전압
 i_1, i_2 : 1차, 2차 전류, R_1, R_2 : 1차, 2차 권선저항
 L_{11}, L_{12} : 1차, 2차 누설 인덕턴스
 R_c : 철손저항, L_m : 자화 인덕턴스
 N_1, N_2 : 1차, 2차 권선수, i_e : 여자전류,
 i_c : 철손전류, i_m : 자화전류

그림 2 한 상의 변압기 등가회로
 Fig. 2 Per phase equivalent circuit

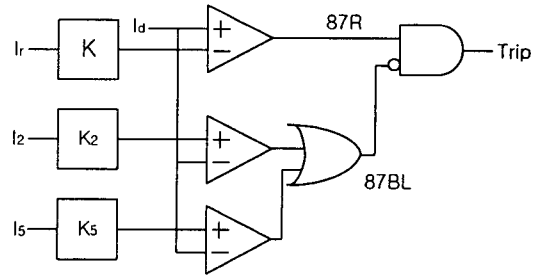


그림 3 고조파 블로킹 전류차동 계전방식
 Fig. 3 Differential relay with harmonic blocking

여기서 I_2 와 I_5 는 각각 차전류의 2조파와 5조파의 크기를 나타내고, K_2 와 K_5 는 상수이다.

2.2 수정된 전류차동 계전방식

본 논문에서는 여자돌입 또는 과여자시에는 i_m 가 증가하는 현상에 착안하여, 이와 i_c 를 추정하여 식 (6)과 같이 차전류를 구하여 변압기를 보호하고자 한다.

$$i_d = i_1 - ai_2 - i_c - i_m \tag{6}$$

이하에서는 i_c 와 i_m 를 추정하는 방식을 기술한다.

2.2.1 철손전류 i_c 추정

i_c 는 그림 2의 등가회로에서 R_c 에 흐르는 전류이다. R_c 는 제작자에 의해서 주어지므로, e_1 을 알면 계산할 수 있다.

변압기에 내부사고가 발생하지 않았다면, 매 순간의 v_1 은 다음과 같다.

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + e_1 \tag{7}$$

식 (7)을 e_1 에 대해 정리하면 식 (8)이 된다.

$$e_1 = v_1 - (R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt}) \tag{8}$$

식 (8)을 통해 e_1 은 계산 가능하므로, i_c 는 식 (9)로부터 구할 수 있다.

$$i_c = \frac{e_1}{R_c} \tag{9}$$

식 (8)에서 유기전압을 구하는데 미분항이 존재한다. 이를 근사화하기 위해서 사다리꼴 방식을 사용하면 수치진동의 가능성이 있어, 본 논문에서는 참고문헌 [13]의 식 (10)의 형태로 병렬 저항을 삽입하여 구하였다. 그림 4에 이러한 모델을 나타내었다.

$$v_L(t) = \frac{1}{\frac{dt}{2L} + \frac{1}{R_p}} \{i(t) - i(t - \Delta t)\} - \frac{R_p - \frac{2L}{\Delta t}}{R_p + \frac{2L}{\Delta t}} v(t - \Delta t) \tag{10}$$

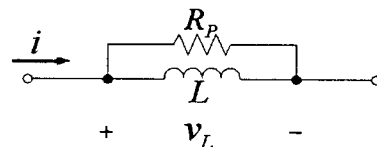


그림 4 병렬 감쇠 저항을 사용한 인덕턴스 모델
 Fig. 4 Inductance model for the parallel damping resistance

2.2.2 자화전류 i_m 추정

식 (8)로부터 e_1 을 구했으므로, 자속은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda(t) = \int_0^t e_1(t)dt + \lambda_0 \tag{11}$$

여기서 초기 자속 λ_0 를 본 논문에서는 0으로 하였다.

자화곡선은 자속과 자화전류의 관계를 나타내고, 이는 변압기 제작자로부터 얻을 수 있다. 그림 5에 구간선형화한 변압기의 자화곡선을 나타내었다. 식 (11)로부터 계산한 자속을 해당되는 구간에 대입하면, 여자돌입시나 과여자시에도 그 자속에 해당하는 i_m 을 추정할 수 있다.

2.2.3 수정 전류차동 방식

제안한 전류차동 알고리즘은 식 (6)을 이용하여 계산한 차전류의 순시값으로부터 기본과 성분을 구하고, 억제전류는 식 (2)로부터 구했으며, 트립 조건은 식 (3)을 사용한다.

3. 사례 연구

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 6과 같은 계통을 선택하였다. 사용한 변압기는 3상 Y-Y 변압기(154kV/22kV, 55 MVA)이고, 발전기 용량은 6 GVA, 부하용량은 55 MVA이다. EMTP를 이용하여 각종 데이터를 생성하였으며, 내부 사고는 참고문헌 [14]의 방식을 이용하여 모델링하였다.

샘플링 비율은 주기 당 64 샘플을 사용하였으며, 저역 통과필터는 저지대역 컷오프 주파수를 1920 Hz인 Butterworth 2차 필터를 설계하여, 모든 전압과 전류를 통과시켰다.

변압기 철심의 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 type-96소자를 사용하였고, HYSDAT를 사용하기 위한 포화점은 (40A, 333.754Vs)를 사용하였다.

사례연구에서의 결과는 A상의 경우만 나타내었다. 여자돌입, 내부사고, 과여자의 경우에 대하여 고조파 블로킹 전류차동 방식과 제안한 방식을 비교하여 성능을 검증하였다. 그림 3의 기존 방식에서는 $K_2 = 10$, $K_5 = 12$ 를 사용하였다.

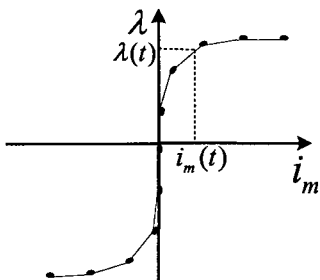


그림 5 자화곡선
Fig. 5 The magnetization curve

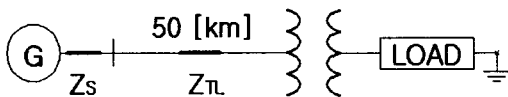


그림 6 모델 시스템
Fig. 6 The model system studied

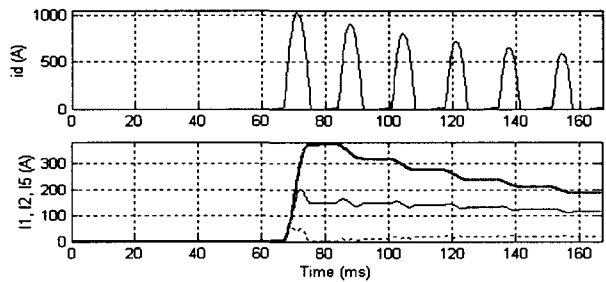
3.1 여자돌입

전류자속을 0%로 하고, 투입 위상각과 부하를 다르게 하여 다양한 여자돌입의 경우를 모의하였다. 그 중에서 두 가지 사례의 결과를 소개한다.

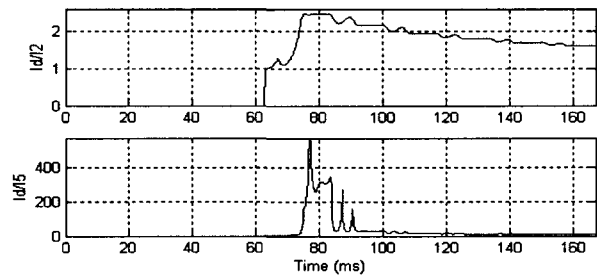
1) 사례 1: 투입 위상각 0도, 무부하

그림 7은 사례 1에 대한 기존의 고조파 블로킹 방식의 결과를 나타내고, 그림 8은 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 그림 7a에서 굵은 실선, 가는 실선, 점선은 각각 I_d , I_2 , I_5 이다. 이 경우는 무부하이기 때문에, 2차 전류는 0이다. 기존 방식의 경우, 차전류는 1차 전류가 되어, 차전류가 많이 발생하게 된다(그림 7a). 따라서, 전류차동 계전기(87R)가 동작영역 안으로 진입하게 된다(그림 8b). 하지만, I_d/I_2 가 $K_2 = 10$ 보다 작기 때문에(그림 7b) 블로킹신호(87BL)가 발생하여(67.4 ms), 87R이 동작(67.7 ms)하더라도 트립신호는 발생하지 않았다(그림 7c). 이는 기존의 고조파 블로킹 방식이 여자돌입시에 계전기의 오동작을 방지함을 알 수 있다. 하지만, K_2 , K_5 로 인하여 내부사고시 계전기의 동작은 늦어지며, K_2 , K_5 의 값을 결정할 때, 코어의 특성 및 계통 조건이 이에 주는 영향을 고려해서 설계해야 하므로 주의가 필요하다.

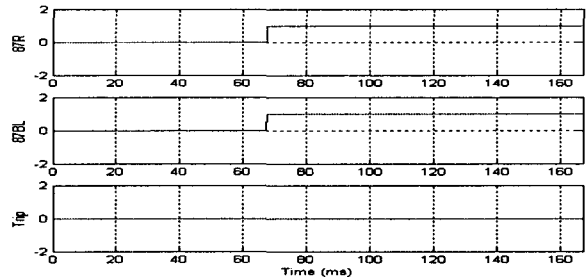
한편, 제안한 방식에서는 차전류를 1차 전류에서 2차 전류 철손전류, 자화전류를 빼서 구하므로, 수정된 차전류의 값이 매우 작기 때문에(그림 8a), 동작영역 안으로 진입하지 않는다(그림 8b).



(a) 차전류의 순시값과 고조파 성분

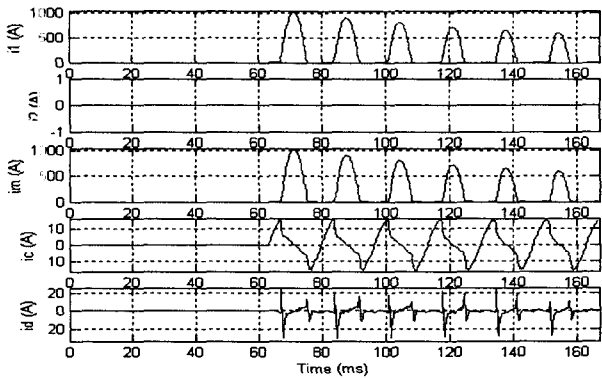


(b) I_d/I_2 와 I_d/I_5

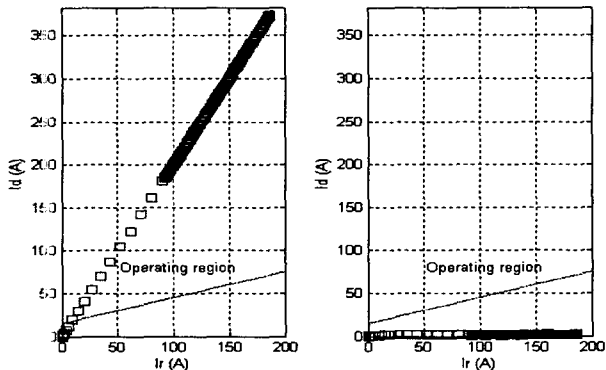


(c) 87R, 87BL과 트립신호

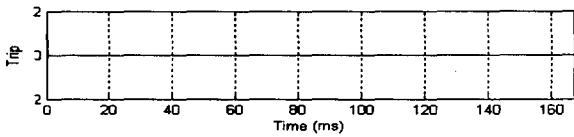
그림 7 기존 고조파 블로킹 방식(사례 1)
Fig. 7 The conventional harmonic blocking algorithm (Case 1)



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류



(b) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작



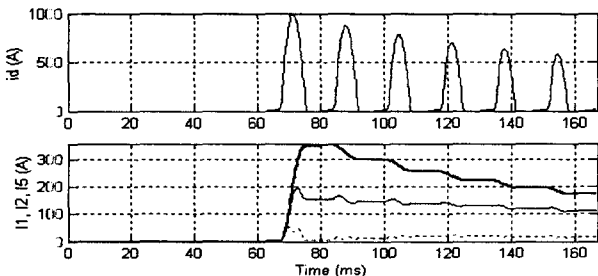
(c) 트립신호

그림 8 제안한 방식(사례 1)

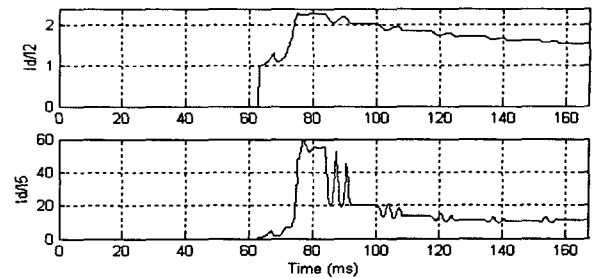
Fig. 8 The proposed algorithm (Case 1)

2) 사례 2: 투입 위상각 0도, 전부하

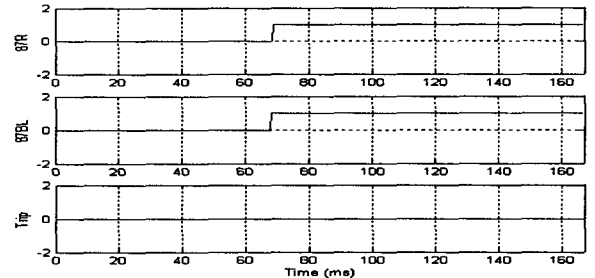
그림 9와 10은 사례 2에 대한 기존 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 이 경우는 전부하이기 때문에, 사례 1과는 달리 2차 전류가 존재하게 된다(그림 10a). 기존 방식의 경우 차전류가 발생하게 되고(그림 9a), 계전기가 동작영역 안으로 진입하게 된다(그림 10b). 차전류는 사례 1과 거의 같지만, 억제전류가 다르기 때문에, 계전기 동작은 사례 1과 다르다. 하지만, 67.96 ms에 발생한 블로킹신호 때문에 트립신호는 발생하지 않았다(그림 9b). 한편, 제안한 방식에서 구한 차전류는 작기 때문에(그림 10a), 동작영역 안으로 들어가지 않으며 그림 10b), 트립신호가 발생되지 않았다(그림 10c).



(a) 차전류의 순시값과 고조파 성분



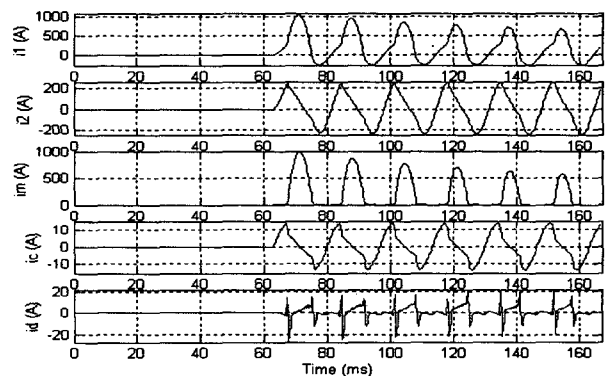
(b) I_d/I_2 와 I_d/I_5



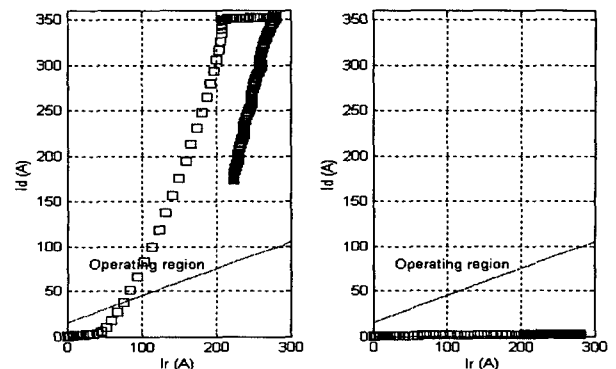
(c) 87R, 87BL과 트립신호

그림 9 기존 고조파 블로킹 방식(사례 2)

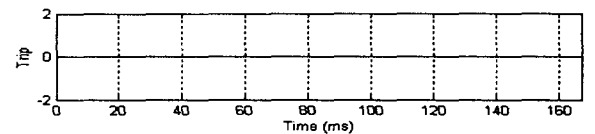
Fig. 9 The conventional harmonic blocking algorithm (Case 2)



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류



(b) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작



(c) 트립신호

그림 10 제안한 방식(사례 2)

Fig. 10 The proposed algorithm (Case 2)

3.2 내부사고

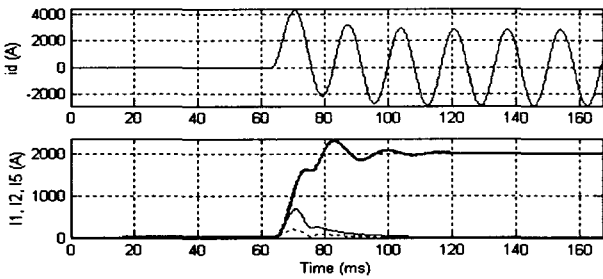
1차 권선의 A상에 다양한 내부사고를 모의하여 제안한 방식을 시험하였으며, 두 경우의 결과를 나타내었다.

1) 사례 3: 중성점으로부터 80% 지점의 0도 지락사고

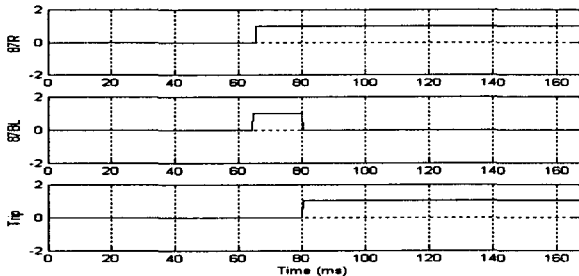
2) 사례 4: 중성점에서 60%와 70% 지점의 0도 단락사고

그림 11과 12는 사례 3, 그림 13과 14는 사례 4에 대한 기존 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 그림 11a, 13a에서 나타난 바와 같이, 내부사고시에도 사고 이후에 고조파가 발생하여 시간이 지남에 따라 감소함을 알 수 있다. 이러한 감소는 계통 시정수에 따라 다르다. 따라서, 고조파가 존재하는 시간동안에는 계전기의 동작을 지연시킨다. 사례 3의 경우, 기존 방식에서 사고 발생 이후 2.9 ms에 87R이 동작하였지만, 트립신호가 블로킹신호 때문에 지연되어 사고 후 17.7 ms에 발생되었고 즉, 약 15 ms의 계전기 동작의 지연이 발생하였다. 반면, 제안한 방식에서는 사고 후 2.9 ms에 트립신호가 발생되었다.

사례 4의 경우도, 기존 방식에서는 사고 후 17.97 ms에 트립신호가 발생된(약 15 ms 시지연) 반면, 제안한 방식에서는 사고 후 3.12 ms에 트립신호가 발생되었다.



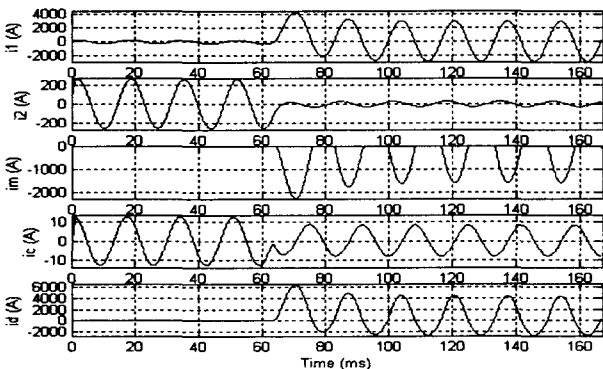
(a) 차전류의 순시값과 고조파 성분



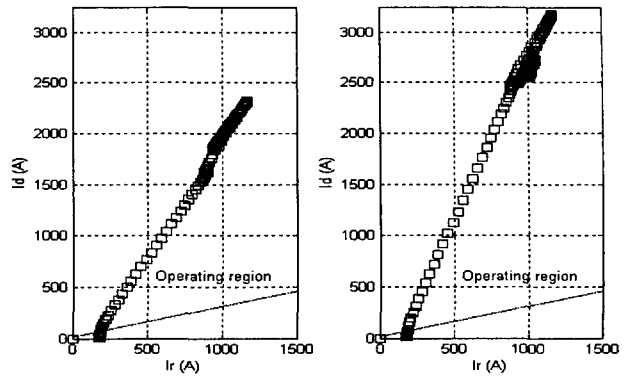
(b) 87R, 87BL과 트립신호

그림 11 기존 고조파 블로킹 방식(사례 3)

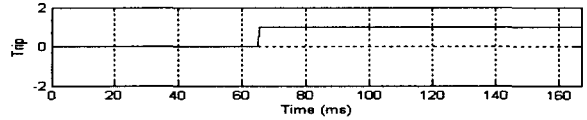
Fig. 11 The conventional harmonic blocking algorithm(Case 3)



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류



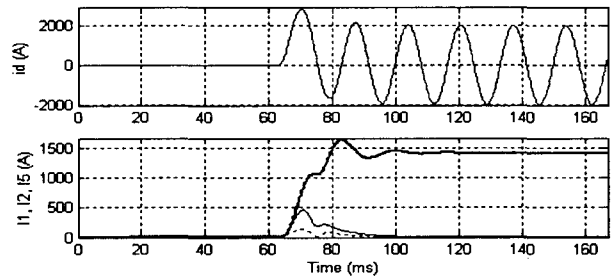
(b) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작특성



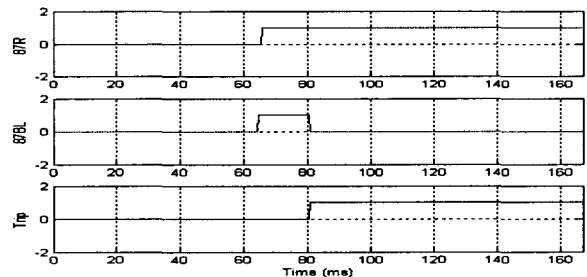
(c) 트립신호

그림 12 제안한 방식(사례 3)

Fig. 12 The proposed algorithm (Case 3)



(a) 차전류의 순시값과 고조파 성분



(b) 87R, 87BL과 트립신호

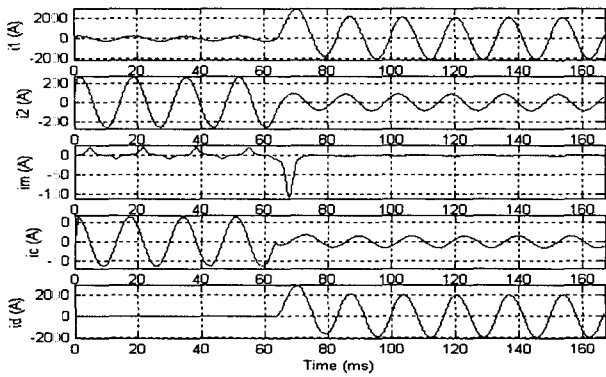
그림 13 기존 고조파 블로킹 방식(사례 4)

Fig. 13 The conventional harmonic blocking algorithm(Case 4)

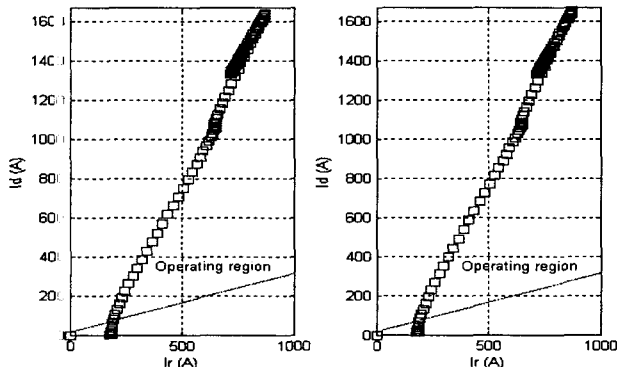
3.3 과여자

1) 사례 5: 1차 정격전압의 1.5배의 전압이 62.5 ms에 투입

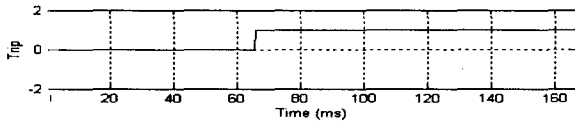
그림 15와 16은 사례 5에 대한 기존 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 과전압이 62.5 ms에 인가됨으로 인하여 차전류가 점차 커짐을 알 수 있다(그림 15a). 따라서, 기존의 방식은 약 한 주기 후인 79.94 ms에 동작영역 안으로 진입하였다(그림 16b). 하지만 69.27 ms에 발생한 블로킹신호 때문에 트립신호가 발생되지 않았다(그림 15b). 한편, 제안한 방식에서 구한 차전류는 임계값보다 작기 때문에(그림 16a), 동작영역 안으로 들어가지 않으며(그림 16b), 트립신호가 발생되지 않았다(그림 16c).



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류



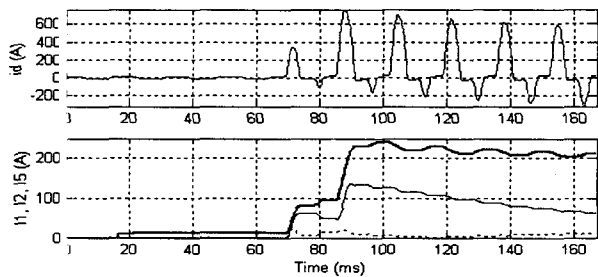
(b) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작특성



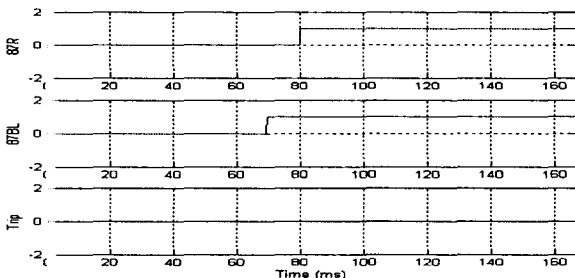
(c) 트립신호

그림 14 제안한 방식(사례 4)

Fig. 14 The proposed algorithm (Case 4)



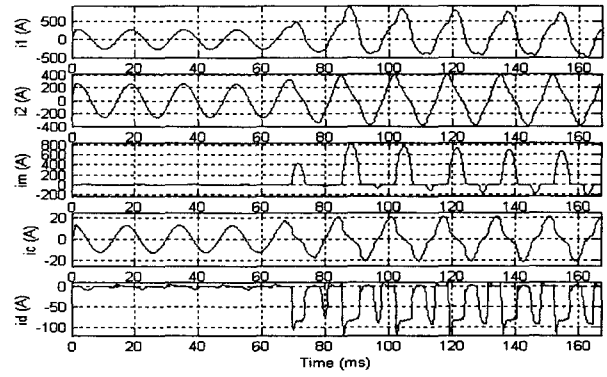
(a) 차전류의 순시값과 고조파 성분



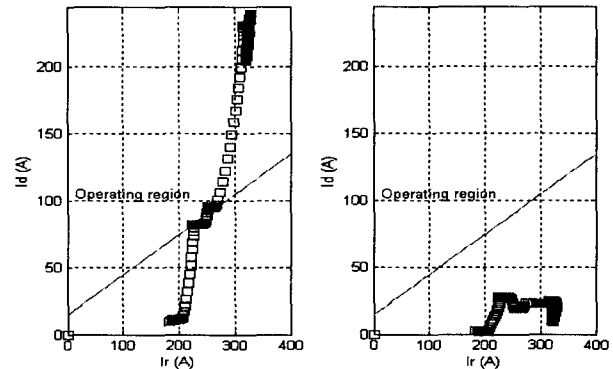
(b) 87R, 87BL과 트립신호

그림 15 기존 고조파 블로킹 방식(사례 5)

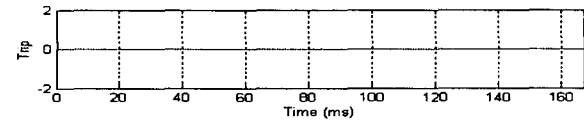
Fig. 15 The conventional harmonic blocking algorithm(Case 5)



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류



(b) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작특성



(c) 트립신호

그림 16 제안한 방식(사례 5)

Fig. 16 The proposed algorithm (Case 5)

4. 결론

본 논문에서는 변압기 철심의 비선형 특성을 고려한 수정 전류차동 계전방식을 제안하였다. 제안한 방식은 철손저항과 유기전압으로부터 철손전류를 계산하고, 자화곡선과 자속으로부터 자화전류를 계산하여, 기존의 차전류에서 두 전류를 빼서, 수정된 차전류를 구하여 사고를 판단하였다.

기존의 고조파 블로킹 방식과 제안한 방식의 성능을 여러 가지 조건에서 비교한 결과, 제안한 방식은 여자돌입시나 과여자시에 오동작하지 않을 뿐만 아니라, 내부사고의 경우에는 기존 방식에 비해, 속도가 15 ms 정도 개선됨을 볼 수 있었다.

제안한 방식은 차전류에 포함되어 있는 고조파 성분에 영향을 받지 않기 때문에, 설계시 이를 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 또한, 변압기 양단의 전압을 필요로 하는 변압기 모델에 기초한 방식에 비해, 제안한 방식은 변압기의 1차 전압만 필요하다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] A.G. Phadke, and J.S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, Research Studies Press LTD., 1988.
 [2] C. D. Hayward, "Harmonic-Current-Restrained Relays for Transformer Differential Protection," *AIEE Trans.* vol. 60, pp. 377-382, 1941.
 [3] C. W. Mathews, "An improved transformer differential relay," *AIEE Trans. Part III*, vol. 73, pp. 645-650, Jun. 1954.
 [4] R. L. Sharp, and W. E. Glassburn, "A Transformer Differential Relay with Second-Harmonic Restraint," *AIEE Trans. Part III*, vol. 77, pp. 913-918, 1958.
 [5] 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.
 [6] G. D. Rockefeller, "Fault Protection with a Digital Computer," *IEEE Trans. on PAS*, vol. 88, no. 4, pp. 438-462, Apr. 1969.
 [7] A. Giuliante, and G. Clough, "Advances in the design of differential protection for power transformers," 1991 Georgia Tech. Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, May 13, 1991, pp. 1-12.
 [8] E. L. Harder, and W. E. Marter, "Principles and practices of relaying in the United States," *AIEE Trans. Part II*, vol. 67, pp. 1005-1022, 1948.
 [9] 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.
 [10] K. Inagaki, M. Higaki, Y. Matsui, K. Kurita, M. Suzuki, K. Yoshida, and T. Maeda, "Digital Protection Method for Power Transformers Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 3, no. 4, pp. 1501-1510, Oct. 1988.
 [11] 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.

[12] 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 1519, 2001, Vancouver, BC Canada.
 [13] *Electromagnetic Transients Program Theory Book* Chapter 2, 1986.
 [14] 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 (姜龍徹)

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



김은숙 (金恩淑)

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



원성호 (元成浩)

1976년 10월 19일생. 2002년 전주대 공대 전기공학과 졸업. 현재 전북대 공대 전기공학과 석사과정
 E-mail : wsungcho@dreamwiz.com