

Y-Δ 변압기 보호용 수정 전류차동 계전기

강용철 · 김은숙 · 이병은
 전북대학교, 차세대전력기술연구소

Modified Current Differential Relay for Y-Δ Transformer Protection

Yong-Cheol Kang · En-Shu Jin · Byung-Eun Lee
 Chonbuk National University, NPT Center

Abstract - This paper proposes a modified current differential relay for Y-Δ transformer protection. 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. A method to estimate the circulating component of the delta winding current is proposed. To cope with the remanent flux, before saturation, the core-loss current is calculated and used 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 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. Test results indicate that the modified relay remained stable during severe magnetic inrush and over-excitation because the exciting current was successfully compensated. The relay correctly discriminates magnetic inrush and over-excitation from an internal fault and is not affected by the level of remanent flux.

기가 제안되었다[6]. 이 방식은 여자돌입이나 과여자시에 큰 값을 갖는 자화전류와 철손전류를 보상하여 보호하는 방식으로서, 별도의 억제 또는 블로킹 방식이 필요하지 않기 때문에 내부사고시 동작속도가 빠르다. 하지만, 이 방식은 잔류자속이 있는 경우에는 정확한 자속을 계산하기 어려운 문제가 있다.

잔류자속이 존재하는 경우의 문제점을 해결하고자, 잔류자속에 무관한 변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식이 제안되었다[7]. 이 방식은 [6]에서와 마찬가지로 철손전류, 자화전류를 보상하지만, 잔류자속의 문제를 해결하기 위하여, 철심의 포화 이전과 포화 이후로 나누어서 각각 다른 형태의 수정된 차전류를 계산한다. 포화 이전에는 자화전류가 무시할 만큼 작기 때문에 철손전류만을 구하여 수정된 차전류를 계산한다. 한편, 차전류가 임계값을 초과하게 되면, 철심이 포화되었다고 판단하고, 그 순간의 차전류(자화전류)를 자화곡선에 대입하여, 자속을 구한다. 이 값을 자속을 계산하기 위한 초기자속으로 간주하여, 그 이후에는 초기자속으로부터 매 순간의 자속을 구하고, 이 값을 자화곡선에 대입하여, 자화전류를 추정한다. 이로부터 수정된 차전류를 구하여 사고를 판단하는 방식이다.

본 논문에서는 [7]의 방식을 Y-Δ 변압기에 적용한 연구로서, Y-Δ 변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식에 대해 기술한다. EMTP를 이용하여 변압기를 모델링한 후, 다양한 조건에서의 여자돌입, 내부사고, 과여자, 외부사고 데이터를 생성하여, 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식의 성능을 비교하였다.

1. 서 론

변압기 보호 계전기는 내부사고를 여자돌입 및 과여자 등과 정확하게 구분할 수 있어야 한다. 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 방식들은 여자돌입이나 과여자시에 오동작을 방지할 수 있지만, 내부사고시 계전기의 동작시간이 지연되는 단점이 있다[2, 3].

이러한 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 계전방식은 전력 설비에 유입되는 전류와 유출되는 전류의 차이를 고려하여 설비를 보호하는 방식이다. 하지만, 변압기 보호의 경우에는 유·출입 전류만을 고려하게 되면, 여자돌입이나 과여자시에 매우 증가하는 자화전류를 고려할 수 없어 전류차동 계전기가 오동작하게 되므로, 별도의 억제 또는 블로킹 방식이 필요하다. 이러한 변압기 보호용 전류차동 계전기의 단점을 극복하고자, 1차, 2차 전류뿐만 아니라, 철손전류와 자화전류를 고려하여 차전류를 구하여 보호하는 수정 전류차동 계전

2. Y-Δ 변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식

그림 1에 3상 Y-Δ 변압기와 이의 등가회로를 나타내었다. 등가회로에서 $R_A=R_B=R_C=R_1$, $L_{IA}=L_{IB}=L_{IC}=L_n$, $R_{ab} \approx R_{bc} \approx R_{ca} \approx R_2$, $L_{Iab} \approx L_{Ibc} \approx L_{Ica} \approx L_{I2}$ 이라고 가정한다.

변압기 각 상의 1차, 2차 단자전압은 다음과 같다.

$$v_A = R_1 i_A + L_n \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (1)$$

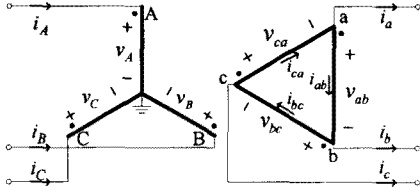
$$v_B = R_1 i_B + L_n \frac{di_B}{dt} + e_B \quad (2)$$

$$v_C = R_1 i_C + L_n \frac{di_C}{dt} + e_C \quad (3)$$

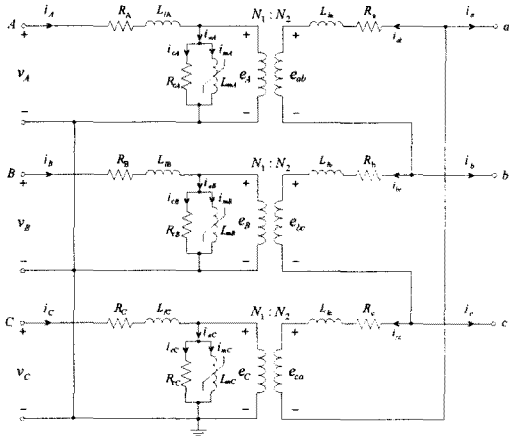
$$v_{ab} = R_2 i_{ab} + L_2 \frac{di_{ab}}{dt} + e_{ab} \quad (4)$$

$$v_{bc} = R_2 i_{bc} + L_2 \frac{di_{bc}}{dt} + e_{bc} \quad (5)$$

$$v_{ca} = R_2 i_{ca} + L_2 \frac{di_{ca}}{dt} + e_{ca} \quad (6)$$



$U_A, U_B, U_C, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$: 각 상의 1, 2차 단자전압
 i_A, i_B, i_C : 각 상의 1차 전류
 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} : 각 상의 2차 권선전류
 i_a, i_b, i_c : 각 상의 2차 선 전류
 (a) 3상 Y-Δ 변압기



$e_A, e_B, e_C, e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}$: 각 상의 1, 2차 유기전압
 $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$: 각 상의 1, 2차 권선저항
 $L_{lA}, L_{lB}, L_{lC}, L_{la}, L_{lb}, L_{lc}$: 각 상의 1, 2차 누설인덕턴스
 R_{cA}, R_{cB}, R_{cC} : 각 상의 철손저항
 L_{mA}, L_{mB}, L_{mC} : 각 상의 자화인덕턴스
 N_1, N_2 : 1, 2차 권선수
 i_{eA}, i_{eB}, i_{eC} : 각 상의 여자전류
 $i_{cA}, i_{cB}, i_{cC}, i_{mA}, i_{mB}, i_{mC}$: 각 상의 철손전류와 자화전류
 (b) 등가회로

그림 1 3상 Y-Δ 변압기와 그의 등가회로
 Fig. 1 Three phase Y-Δ transformer and its equivalent circuit

2.1 기존 전류차동 계전방식

Y-Δ 변압기 A상의 경우, 기존의 전류차동 계전방식은 식 (7)과 같이 차전류 기본과의 크기 I_{dA} 를 구한다.

$$I_{dA} = \left| \vec{I}_C - \vec{I}_A + a \vec{I}_a \right| \quad (7)$$

여기서 $\vec{I}_A, \vec{I}_C, \vec{I}_a$ 는 1차 A상, C상 전류와 2차 a상 선 전류 기본과의 페이저이고, a 는 N_2/N_1 이다. 또한, A상의 억제전류의 기본과 성분 I_{rA} 는 식 (8)과 같이 계산하며, 전류차동 계전기의 트립 조건은 식 (9)와 같다.

$$I_{rA} = \left| \frac{\vec{I}_C - \vec{I}_A - a \vec{I}_a}{2} \right| \quad (8)$$

$$I_{dA} \geq I_{offset} + KI_{rA} \quad I_{offset} = 15A \quad (9)$$

본 논문에서는 계전기의 감도 K 를 0.3으로 설정하였다.

2.2 수정된 전류차동 계전방식

참고문헌 [7]과 같이, 본 논문에서는 철심의 포화 이전

과 포화 이후로 나누어서, 각각 다른 형태의 수정된 차전류를 구하여 보호한다. 즉, 제한한 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. 제한한 방식의 흐름도를 그림 2에 나타내었다.

Y-Δ 변압기의 경우, 수정된 차전류를 구하기 위해서는 Δ 측 권선전류가 필요하다. 따라서, 먼저 Δ 측 권선전류를 추정하는 방식에 대해 기술한다.

2.2.1 Δ측 권선전류 i_{ab} 추정

변압기 2차측 즉 Δ 측 각 상의 권선전류 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 는 각각 두 부분으로 나눌 수 있다. 한 부분은 비순환전류 성분 i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} 이고, 또 한 부분은 순환전류 성분 i_{Δ} 이다.

$$i_{ab} = i_{pa} + i_{\Delta}, i_{bc} = i_{pb} + i_{\Delta}, i_{ca} = i_{pc} + i_{\Delta} \quad (10)$$

순환전류 성분 i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} 는 식 (11)과 같이 구할 수 있다[4].

$$i_{pa} = \frac{i_b - i_a}{3}, i_{pb} = \frac{i_c - i_b}{3}, i_{pc} = \frac{i_a - i_c}{3} \quad (11)$$

식 (1)~(3)을 1차 3상 상의 유기전압에 대해 정리하면 식 (12)~(14)와 같다. 즉 1차 각 상의 유기전압 e_A, e_B, e_C 는 식 (12)~(14)로부터 구할 수 있다.

$$e_A = v_A - R_1 i_A - L_n \frac{di_A}{dt} \quad (12)$$

$$e_B = v_B - R_1 i_B - L_n \frac{di_B}{dt} \quad (13)$$

$$e_C = v_C - R_1 i_C - L_n \frac{di_C}{dt} \quad (14)$$

식 (4)~(6)을 합치면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$e_{ab} + e_{bc} + e_{ca} = L_n \frac{d(3i_{\Delta})}{dt} + R_2(3i_{\Delta}) \quad (15)$$

변압기에 내부사고 발생하지 않았다면, 1차, 2차 유기전압 사이에 식 (16)이 성립한다.

$$\frac{e_A}{e_{ab}} = \frac{N_1}{N_2}, \frac{e_B}{e_{bc}} = \frac{N_1}{N_2}, \frac{e_C}{e_{ca}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

따라서, 변압기 2차 각 상의 유기전압 e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} 는 e_A, e_B, e_C 과 식 (16)을 통해 구할 수 있으므로, 순환전류 성분 i_{Δ} 는 식 (15)로부터 구할 수 있다. 추정된 순환전류 성분 i_{Δ} 과 식 (11)을 식 (10)에 대입하면, Δ 측 각 상의 권선전류 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 를 계산할 수 있다.

2.2.2 철심의 포화 이전 (sat_ind = 0)

철심의 포화 이전(그림 2의 sat_ind = 0)에는 철손전류 i_{cA} 만을 추정하여 수정된 차전류를 구한다.

식 (12)를 통해 e_A 는 계산 가능하므로, 철손전류 i_{cA} 는 식 (17)로부터 구할 수 있다.

$$i_{cA} = \frac{e_A}{R_{cA}} \quad (17)$$

R_{cA} 는 제작자에 의해서 주어진다. 따라서, 포화 이전에는 식 (18)의 수정된 차전류를 구하고, 이의 기본과 성분을 구한다.

$$i_{dA} = i_A + a i_{ab} - i_{cA} \quad (18)$$

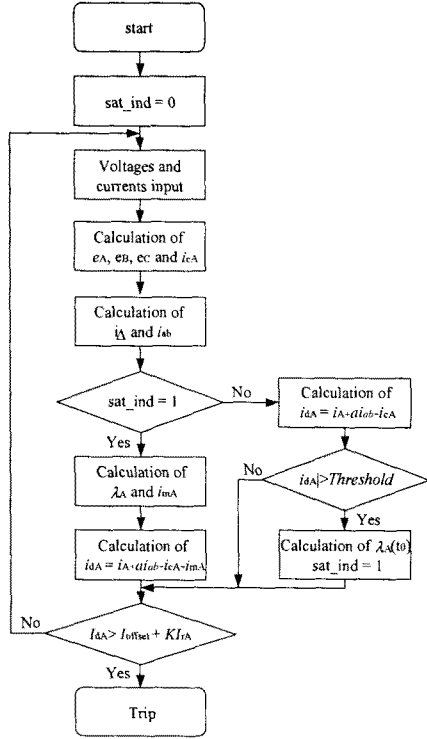


그림 2 제안한 방식의 흐름도
Fig. 2 Flow chart of proposed relay

2.2.3 철심의 포화 이후 (sat_ind = 1)

포화 이전에는 자화전류가 크지 않으므로 식 (18)의 i_{dA} 는 아주 작으며, 포화 되면 이 값이 매우 커진다. 본문에서는 i_{dA} 가 임계값을 초과하면, 포화시작이라고 판단한다. 이를 위한 임계값은 포화점 전류값보다 크게 선택하면 된다.

포화시작 순간에서의 i_{dA} 는 자화전류로 간주할 수 있기 때문에, 그 순간의 i_{dA} 를 자화곡선에 대입하면 포화순간의 자속을 구할 수 있다. 이 자속을 λ_{A0} 로 하면, 포화 이후 자속 λ_A 는 식 (19)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\lambda_A = \int_0^t e_A dt + \lambda_{A0} \quad (19)$$

λ_A 를 자화곡선에 대입하여, 그 자속에 해당하는 자화전류 i_{mA} 를 추정한다.

한편, 포화 이후에도 철손전류는 식 (17)을 이용하여 구한다. 최종적으로 포화 이후에는 다음 식을 이용하여 수정된 차전류를 구한다.

$$i_{dA} = i_A + ai_{ab} - i_{cA} - i_{mA} \quad (20)$$

포화 이후에는 식 (20)을 이용해서 구한 수정된 차전류의 기본과 성분과 식 (8)의 억제전류가 식 (9)의 트립 조건을 만족하면 사고라고 판단한다.

3. 사례연구

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 그림 3과 같은 모델 계통을 선택하였다. 3상 Y- Δ 변압기 (154kV/13kV, 55 MVA)를 EMTP를 이용하여 모델링하였고, 샘플링 비율은 주기당 64샘플을 사용하였다. 내부 사고는 참고문헌 [8]의 방식을 이용하여 모델링하였다.

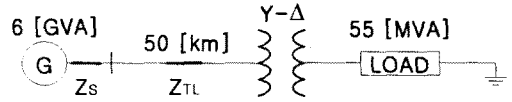


그림 3 모델 시스템
Fig. 3 Model system studied

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

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

3.1 여자돌입

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

1) 사례 1: 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%, 무부하

그림 4는 사례 1에 대한 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 변압기는 29.2ms에 투입하였다. 그림 4d에서 점선은 기존 방식의 트립신호를 나타내고, 실선은 제안한 방식의 트립신호를 나타낸다. 투입 위상각이 0도이기 때문에, 철심이 심하게 포화되어, 기존 방식의 경우, 펄스 모양의 차전류가 발생하며, 첫 번째 펄스의 크기는 약 2300A이다(그림 4a). 따라서, 계전기가 동작영역 안으로 진입하게 되어(그림 4c), 32.3ms(투입 후 3.1ms)에 트립신호가 발생하였다(그림 4d).

한편, 제안한 방식에서는 31.5ms에 포화시작순간을 검출하여, 계산된 초기자속은 342Vs이다. 식 (19)를 이용하여 계산된 λ_A 를 자화곡선에 대입하므로써 자화전류 i_{mA} 를 추정하였다(그림 4b). 1차 전류 i_A 에서 2차 전류 $-ai_{ab}$, 철손전류 i_{cA} , 자화전류 i_{mA} 를 빼서 수정된 차전류의 값이 매우 작기 때문에, 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않았으며(그림 4c), 트립신호가 발생하지 않았다(그림 4d).

3.2 내부사고

1차 권선의 A상에 다양한 내부사고를 모의하여 제안한 방식을 시험하였다.

1) 사례 2: 중성점으로부터 80% 지점의 0도 지락사고

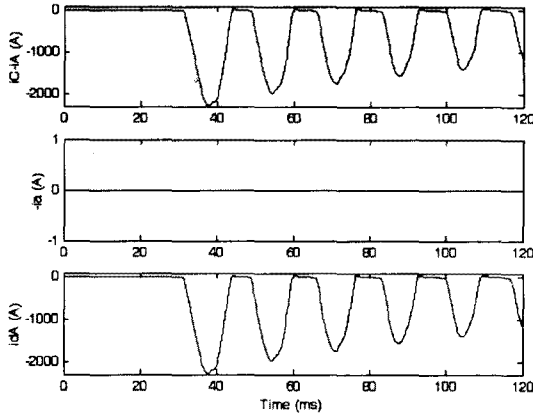
그림 5는 사례 2에 대한 기존의 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. A상에서 지락사고가 29.2ms에 발생하였다. 기존 방식의 경우, 32.0ms(사고 발생 후 2.8ms)에 계전기가 동작영역 안으로 진입하게 되어, 트립신호가 발생하였다.

한편, 제안한 방식에서는 30.2ms에 포화시작순간을 검출하였다. 제안한 방식은 31.5ms(사고 발생 후 2.3ms)에 트립신호가 발생하였다(그림 5d).

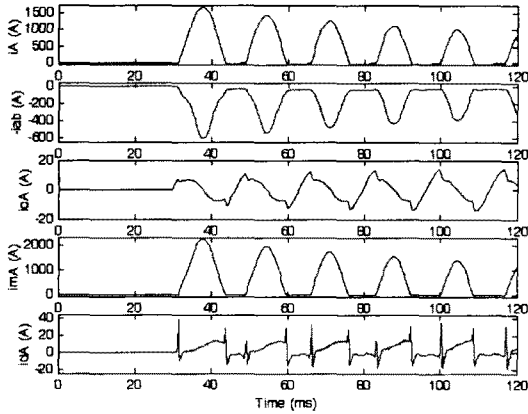
3.3 과여자

1) 사례 3: 1차 정격전압의 1.5배의 전압을 인가

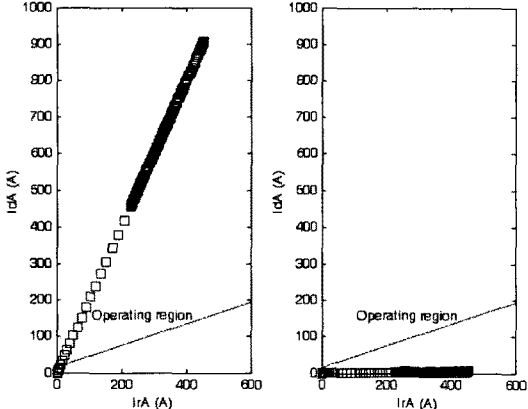
그림 6은 사례 3에 대한 기존의 방식과 제안한 방식의 결과를 나타낸다. 1.5배의 과전압이 29.2 ms에 인가되었다. 따라서, 기존 방식의 경우, 계전기가 38.8ms(사고 발생 후 9.6ms)에 동작영역 안으로 진입하여, 트립신호가 발생하였다. 한편, 제안한 방식에서는 수정된 차전류가 아주 작기 때문에(그림 6b), 계전기가 동작영역 안으로 진입하지 않았으며, 트립신호가 발생하지 않았다.



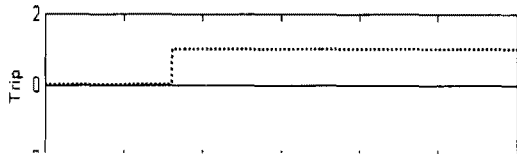
(a) i_c-i_a , $-i_a$ 와 차전류 (기존 방식)의 순시값



(b) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 (제한한 방식)의 순시값

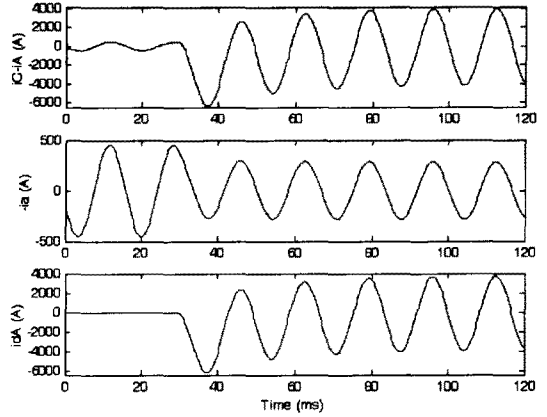


(c) 기존 방식(좌)과 제한한 방식(우)의 계전기 동작

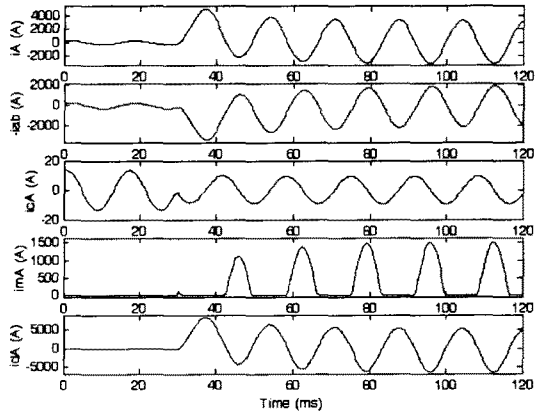


(d) 트립신호

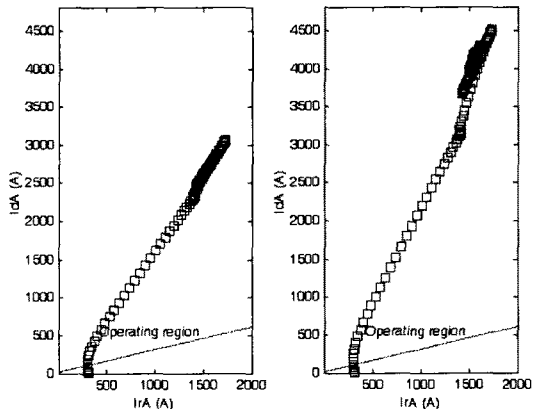
그림 4 사례 1의 결과
Fig. 4 Results for Case 1



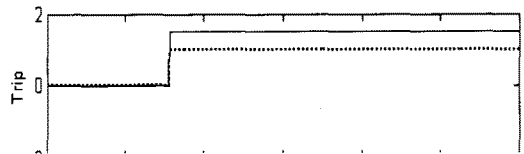
(a) i_c-i_a , $-i_a$ 와 차전류 (기존 방식)의 순시값



(b) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 (제한한 방식)의 순시값

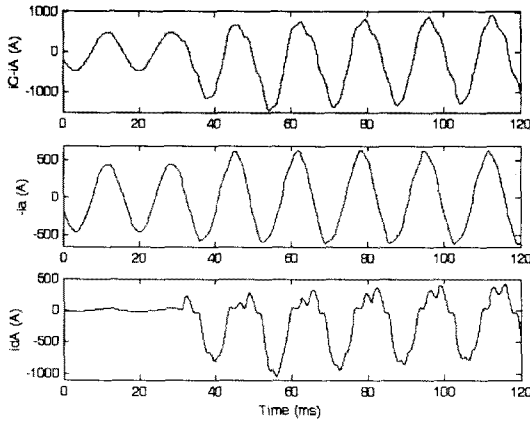


(c) 기존 방식(좌)과 제한한 방식(우)의 계전기 동작

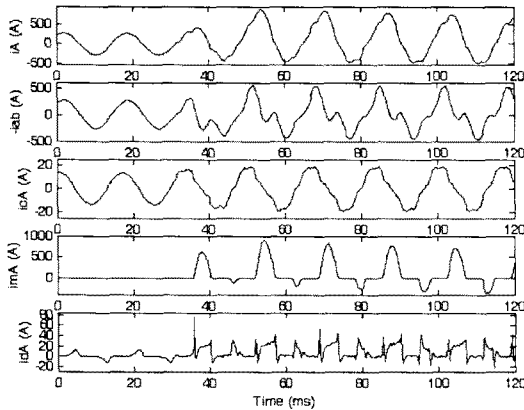


(d) 트립신호

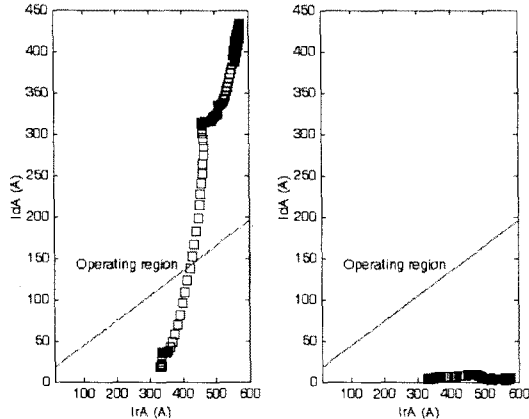
그림 5 사례 2의 결과
Fig. 5 Results for Case 2



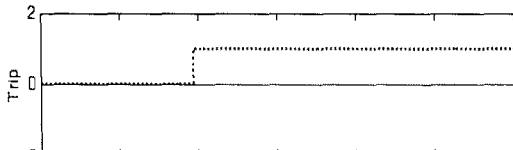
(a) i_c , i_a , i_d 와 차전류 (기존 방식)의 순시값



(b) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 (제안한 방식)의 순시값



(c) 기존 방식(좌)과 제안한 방식(우)의 계전기 동작



(d) 트립신호

그림 6 사례 3의 결과
Fig. 6 Results for Case 3

4. 결 론

본 논문에서는 Y- Δ 변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식을 제안하였다. 또한, Δ 측 권선전류를 추정하는 방법에 대해서도 기술하였다. 제안한 방식은 포화 이전에는 철손전류만을 고려하여 수정된 차전류를 계산하고, 포화 이후에는 철손전류와 자화전류를 고려하여 수정된 차전류를 구하였다. 여자돌입, 내부사고, 과여자 등의 경우에 대하여 제안한 방식의 성능을 검증한 결과, 수정된 차전류가 아주 작기 때문에, 내부사고를 여자돌입, 과여자와 정확하게 구분하였다.

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

감사의 글

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

[참고 문헌]

- [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, and P.A. Crossley, "Transformer Protection based on the increment of the flux linkages," *IEE Proc. Gener. Trans. Distr.*, vol. 151, no. 4, pp. 281-289, May 2004.
- [6] 강용철, 김은숙, 원성호, "변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식," *전기학회 논문지 A*, 제53권 제2호, pp. 80-86, 2004년2월.
- [7] Y.C. Kang, E.S. Jin, S.H. Kang and P.A Crossley, "A Compensated-Current Differential Relay for the Protection of Transformers," *IEE Proc. Gener. Trans. Dist.*, vol. 151, no. 3, pp. 281-289, May 2004.
- [8] 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.