

잔류자속을 고려한 변압기 보호용 수정 전류차동 계전방식

강용철* · 김은숙* · 원성호* · 임의재* · 강상희**
 전북대학교* · 차세대전력기술연구소* · 명지대학교** · 차세대전력기술연구소**

A Modified Current Differential Relaying Algorithm for Transformer Protection Considered by a Remanent Flux

Y.C Kang* · E.S. Jin* · S.H. Won* · U.J. Lim* · S.H. Kang**
 *Chonbuk National University · *NPT Center, **Myongji University, **NPT Center

Abstract - During magnetic inrush or over-excitation, saturation of the core in a transformer draws a large exciting current. This can cause mal-operation of a differential relay. This paper proposes a modified current differential relay for transformer protection. In order to cope with the remanent flux at the beginning, the start of saturation of the core is detected and the core flux at the instant is estimated by inserting the differential current into a magnetization curve. Then, this core flux value can be used to calculate the core flux. The proposed relay calculates the 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 obtains the modified differential current by subtracting the core-loss current and the magnetizing current from the conventional differential current. The proposed technique not only discriminates magnetic inrush and over-excitation from an internal fault, but also improves the speed of the conventional relay.

1. 서 론

현재 주된 변압기 보호 방식으로 전류차동 계전방식이 사용되어왔다. 하지만, 이는 여자돌입 또는 과여자시에는 자화 전류의 크기가 증가하기 때문에 오동작할 수 있다. 따라서 이러한 여자돌입 및 과여자와 내부사고를 구분하기 위해 고조파 억제 및 블로킹 방식과 파형식별 블로킹 방식이 사용되었다. 하지만 전자의 경우 차전류 내에 매우 적은 고조파 성분이 있는 경우에는 오동작하고, 후자의 경우는 여자돌입시의 특징을 이용한 방식으로서 여자돌입은 잘 구분하나 과여자를 구분할 수 없다는 문제점이 있다[1]. 또한 [2]에 제시된 자속 증분 블로킹 방식은 전압, 전류 신호를 사용하여 자속의 증분을 계산하여 방지하는 방식이다. 하지만, 자속을 구하는 데 권선 저항을 무시하였으며, 권선 저항이 존재하는 경우에는 정동작을 기대할 수 없다.

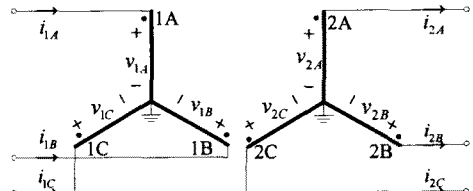
여자돌입이란 철심의 자화 인덕턴스의 비선형에 기인한 것으로, 변압기 투입시 철심의 한쪽 방향으로의 포화와 비포화를 반복하여 차전류가 임계값 이상으로 존재하게 되어, 전류차동 계전기의 오동작을 유발한다. 또한, 과여자인 과전압 또는 저주파수 운전으로 인해 철심의 양쪽 방향으로의 포화와 비포화를 반복하여 차전류가 임계값 이상으로 존재하게 되어, 전류차동 계전기가 오동작을 유발한다.

본 논문에서는 이러한 점에 착안하여, 변압기 자화 전류와 철손 전류를 고려한 3상 변압기 보호용 전류차동 계전 알고리즘을 제안한다. 제안한 방식은 철손 저항과

계산한 유기전압을 이용하여 철손 전류를 계산한다. 또한, 자화 곡선과 계산한 자속으로부터 자화 가치로 흐르는 자화 전류를 계산한다. 자화 전류를 구하는데, 투입 순간의 철심의 잔류자속을 고려하기 위하여, 먼저 1차 전류에서 철손 전류와 2차 전류를 뺀 자화 전류를 구해서, 이 값이 임계값보다 크게 되면, 철심이 포화되었다고 판단한다. 그 순간의 자화 전류를 자화곡선에 대입하면 그 순간의 자속을 계산할 수 있다. 그 다음 순간부터는 포화 시작 순간의 자속을 초기 값으로 자속을 계산하여 자화곡선에 대입하여 자화전류를 구한다. 따라서, 철심의 포화를 판단한 이후부터는 1차 전류에서 2차 전류, 자화 전류, 철손 전류를 뺀 차전류를 구하여, 이로부터 변압기를 보호하는 방식이다. EMTP를 이용하여 3상 변압기를 모델링한 후, 다양한 조건에서의 여자돌입, 과여자, 내부사고 데이터를 생성한 후에, 제시한 방식을 검증하였다.

2. 본 론

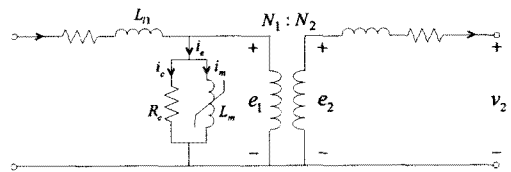
그림 1에 3상 Y-Y 변압기를 나타내었다. 그림 1의 3상 Y-Y 변압기에서 한 상의 등가회로는 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 본 논문에서는 그림 2의 등가회로에서 R_c, R_1, L_1 는 주어진다 가정하였다.



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

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

그림 1 3상 Y-Y 변압기



v_1, v_2 : 1차, 2차 단자전압

i_1, i_2 : 1차, 2차 전류

R_1, R_2 : 1차, 2차 권선저항

L_1, L_2 : 1차, 2차 누설 인덕턴스

R_c : 철손 저항, L_m : 자화 인덕턴스

i_e : 여자 전류, i_c : 철손 전류, i_m : 자화 전류

그림 2 한 상의 변압기 등가회로

기존의 전류차동 계전방식은 식 (1)과 같이 차전류를 구하였다. 따라서, 변압기 철심으로 흐르는 철손 전류와 자화 전류는 계산할 수 없었기 때문에, 여자돌입 또는 과여자에서 오동작 하였다.

$$i_d = i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (1)$$

본 논문에서는 그림 2의 등가회로의 i_c 와 i_m 을 추정하여 식 (2)와 같이 차전류를 구하여 변압기를 보호하고자 한다.

$$i_d = i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 - i_c - i_m \quad (2)$$

이하에서는 i_c 와 i_m 을 추정하는 방식을 기술한다.

2.1 철손전류 i_c 추정

i_c 는 그림 2의 등가회로 R_c 에 흐르는 전류이다. R_c 는 제작자에 의해서 주어지므로, R_c 에 걸리는 유기전압 e_1 을 안다면 계산할 수 있다.

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

$$v_1 = R_1 i_1 + L_A \frac{di_1}{dt} + e_1 \quad (3)$$

e_1 에 대해 식 (3)을 정리하면 식 (4)가 된다.

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

e_1 을 알면 식 (4)를 통해 계산 가능하므로, 어떤 순간의 i_c 는 식 (5)로부터 구할 수 있다.

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

식 (4)에서 유기전압을 구하는데 미분항이 존재한다. 이를 근사화하기 위하여 사다리꼴 방식을 사용하면 수치진동의 가능성이 있어, 본 논문에서는 참고문헌 [3]의 식 (6)의 형태로 병렬 저항을 삽입하여 구하였다. 그림 3에 이러한 모델을 나타내었다.

$$v_L(t) = \frac{1}{\frac{dt}{2L} + \frac{1}{R_p}} \{i(t) - i(t-dt)\} - \frac{R_p - \frac{2L}{dt}}{R_p + \frac{2L}{dt}} v(t-dt) \quad (6)$$

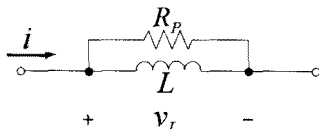


그림 3 병렬 감쇠 저항을 사용한 인덕턴스 모델

2.2 자화전류 i_m 추정

식 (4)로부터 e_1 을 구했으므로, 자속은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

시간 t_0 에서의 쇄교자속 $\lambda(t_0)$ 를 알 수 있으면, 식 (7)로부터 매 순간의 $\lambda(t)$ 를 계산할 수 있게 된다.

하지만, $\lambda(t_0)$ 에는 투입 초기의 잔류자속의 값이 포함되어 있으며, 잔류자속은 알기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 초기의 자화 전류를 계산한다.

$$i_m = i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 - i_c \quad (8)$$

이 값은 변압기 자속이 포화점 이하일 때는 매우 작은 값이 된다. 그러다가 포화점 이상이 되면, 큰 값을 갖게 된다. 따라서, 이 값이 임계값 보다 크면, 철심이 처음 포화되었다고 판단하고, 그 순간의 i_m 값을 자화곡선에 대입함으로써 $\lambda(t_0)$ 를 구할 수 있다. 이 값을 식 (7)에 대입하게 되면, 포화 이후의 매 순간의 철심 자속을 구할 수 있게 된다.

자화 곡선은 철심 자속과 자화 전류의 관계를 나타내고, 변압기 제작자로부터 얻을 수 있다. 그림 4에 구간 선형화한 변압기의 자화 곡선을 나타내었다. 식 (7)로부터 계산한 자속을 자화 곡선에 대입하면, 여자돌입시나 과여자시에도 그 자속에 해당하는 i_m 을 추정할 수 있다.

2.3 제안한 방식

제안한 전류차동 알고리즘은 식 (2)의 차전류의 기본파 성분을 구하고, 억제전류의 기본파 성분은 식 (9)를 이용해서 구한다.

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (9)$$

제안한 방식은 차전류에 포함되어 있는 고조파 전류에 무관하므로, 비율 전류차동 계전기 특성을 사용할 수 있으며, 이를 식 (10)에 나타내었다.

$$I_d \geq I_{offset} + KI_r, \quad K=0.3, \quad I_{offset} \leq 0.2I_1 \quad (10)$$

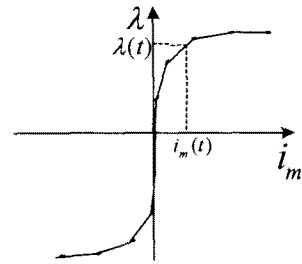


그림 4 자화곡선

3. 사례 연구

제안한 방식을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 모델 계통을 선택하였다. 사용한 변압기는 3상 Y-Y 154kV/22kV, 55 MVA이고, 전원 용량은 6GVA, 부하용량은 55MVA, 역률은 0.9이다. 변압기 내부사고 모델링은 참고문헌 [4]의 방식을 이용하였다.

주기 당 샘플 수는 64샘플로 하였다. 지역 통과 필터로는 지지대역 컷오프 주파수를 1920 [Hz]인 2차 필터를 설계하여, 모든 전압, 전류를 통과시켰다. 변압기 철심의 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 type-96 소자를 사용하였고, HYSDAT를 이용하기 위한 포화점은 (40A, 333.754Vs)를 사용하였다. 사례연구에서의 결과는 A상의 경우만 표시하였다.

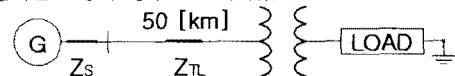


그림 5 모델 시스템

제한한 방식의 성능을 여자돌입, 과여자, 내부사고에 대하여, 기존의 전류차동 계전기의 성능과 비교하였다.

3.1 여자돌입

잔류자속, 투입 위상각, 부하를 다르게 하여 다양한 여자돌입의 경우를 모의하였다. 그 중에서 두 가지 사례의 결과를 소개한다.

1) 사례 1: 잔류자속 0%, 투입 위상각 0도, 무부하

그림 6은 사례 1의 결과를 보여준다. 그림 6a에 나타난 바와 같이, 2차 전류는 0이다. 기존의 차전류는 단순히 1차 전류에서 2차 전류를 빼므로 차전류가 많이 발생하게 되므로, 기존의 전류차동 계전기는 동작영역 안으로 진입하게 된다(그림 6b). 하지만, 제안한 방식에서는, 1차 전류에서 2차 전류, 철손 전류, 자화 전류를 빼서 구하므로, 그 값이 매우 작음을 알 수 있다(그림 6a). 따라서, 제안한 전류차동 방식은 그림 6b에 나타난 바와 같이 동작영역 안으로 진입하지 않게 된다.

2) 사례 2: 잔류자속 80%, 투입 위상각 0도, 무부하

그림 7은 사례 2의 결과를 보여준다. 잔류자속이 80%이므로 사례 1에 비해, 여자전류의 크기가 큼을 알 수 있다(그림 7a). 하지만, 그림 7a에서 보는 것처럼 잔류자속이 존재하더라도 제안한 방식의 차전류의 크기가 매우 작아 7b와 같이 동작영역 안으로 진입하지 않게 된다.

3.2 내부사고

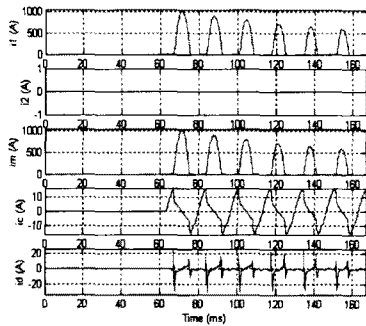
1차 권선의 A상에 다양한 내부사고를 모의하여 제안한 방식을 시험하였으며, 두 사례의 결과를 나타내었다.

1) 사례 3: 중성점으로부터 80% 지점의 0도

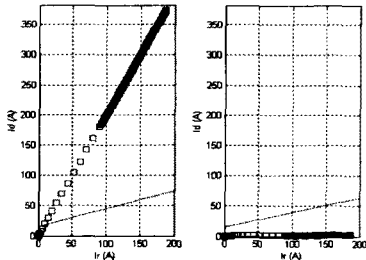
지락사고

2) 사례 4: 중성점에서 60%와 70% 지점의 0도

단락사고

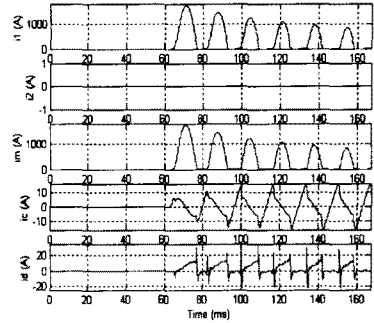


(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형

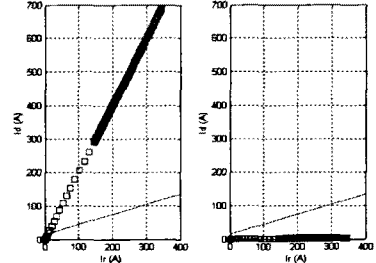


(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 6 사례 1의 결과



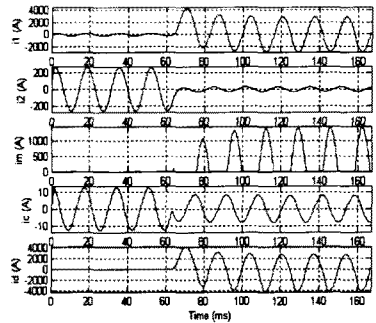
(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형



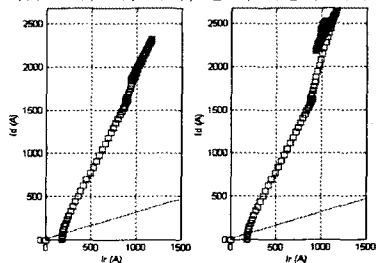
(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 7 사례 2의 결과

그림 8은 사례 3, 그림 9는 사례 4의 경우에 대한 기존 방식과 제안한 방식의 결과를 나타내었다. 그림 8a와 9a와 같이 각각 사고 시점에서 1차 전류는 크게 증가하는데 반해, 2차 전류는 거의 0이 되고, 또한 사고시의 자화 전류의 크기가 작기 때문에 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식 모두 계전기가 올바르게 동작하였다.

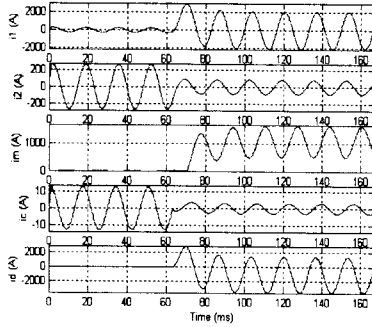


(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형

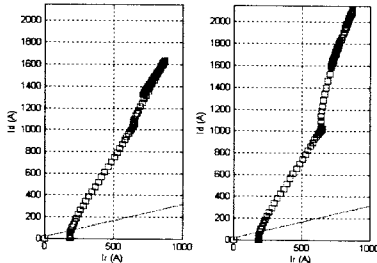


(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 8 사례 3의 결과



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형



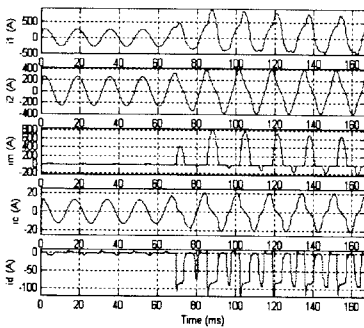
(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 9 사례 4의 결과

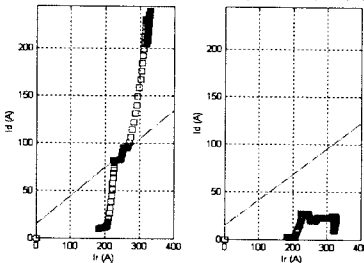
3.3 과여자

1) 사례 5: 1차 정격전압의 1.5배, 투입 위상각 0도

그림 10은 사례 5의 결과를 나타내었다. 과전압 운전으로 인해 자화 전류가 커졌음을 알 수 있고, 이로 인하여 기존의 전류차동 방식은 동작영역 안으로 진입함을 알 수 있다. 하지만 제안한 방식에서 구한 차전류는 작기 때문에, 동작영역 안으로 들어가지 않는다.



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형



(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 10 사례 5의 결과

4. 결 론

본 논문에서는 변압기 철심의 비선형 특성을 고려한 수정 전류차동 계전방식을 제안하였다. 제안한 방식은 철손 저항과 유기전압으로부터 철손 전류를 계산하고, 자화 곡선과 자속으로부터 자화 전류를 계산하여, 기존의 차전류에서 두 전류를 빼서, 수정된 차전류를 구하여 사고를 판단하였다. 투입 초기에 잔류자속이 존재하는 경우에 대비하여, 1차, 2차 전류, 철손 전류로부터 자화 전류를 계산하고 이로부터, 철심 포화시작을 판단하였고, 그 이후에는 자속을 계산하여 자화 전류를 계산하였다.

제안한 방식은 차전류에 포함되어 있는 고조파 성분에 영향을 받지 않기 때문에, 설계 시 이를 고려하지 않아도 되고, 잔류자속이 존재할 시에도 정동작 할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, and 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
- [2] A. G. Phadke, and J.S. Thorp, "A New computer-based flux-restrained current differential relay for power transformer protection" IEEE Trans. on PWRD, vol.10, no.11, pp 3624-3629, November 1983
- [3] *Electromagnetic Transients Program Theory Book*, Chapter 2, 1986.
- [4] 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, April 1994