

비선형 자화특성을 고려한 3상 변압기 보호용 전류차동 계전방식

강용철, 김은숙, 원성호, 임의재, 강상희\*\*  
 전북대학교, 차세대전력기술연구소, 영지대학교\*\*, 차세대전력기술연구소\*\*

A Current Differential Relaying Algorithm for Three-Phase Transformer Considering the Nonlinear Magnetization Characteristics of the Core

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** - This paper describes a current differential relaying algorithm for a three-phase transformer considering the nonlinear magnetization characteristics of the core. The iron-loss current is obtained from the calculated induced voltage and the core-loss resistance. The magnetizing current is calculated from the estimated core flux and the magnetization curve. The proposed algorithm uses the modified differential current, which is obtained by subtracting the iron-loss current and the magnetizing current from the conventional differential current. The various test results show that the algorithm can discriminate internal fault from magnetic inrush, overexcitation and an external fault.

1. 서 론

현재 주된 변압기 보호 방식으로 전류차동 계전방식이 사용되어왔다. 하지만, 여자돌입 또는 과여자 시에는 자화전류의 크기가 증가하기 때문에 오동작할 수 있다. 따라서 이러한 여자돌입 및 과여자와 내부사고를 구분하기 위해 고조파 억제 및 방지와 파형식별 방지, 자속중분 방지 방식이 사용되었다. 하지만 전자의 경우 차동전류 내에 매우 적은 고조파 성분이 있는 경우에는 오동작 하고, 후자의 경우는 여자돌입 시의 특징을 이용한 방식으로서 여자돌입은 잘 구분하나 과여자를 구분할 수 없다는 문제점이 있다[1]. 또한 [2]에 제시된 자속 중분 방지 방식은, 전압, 전류신호를 사용하여 자속의 중분을 계산하여 방지하는 방식이다. 하지만, 자속을 구하는 데 권선 저항을 무시하였으며, 권선저항이 존재하는 경우에는 정 동작을 기대할 수 없다.

여자돌입이란 철심의 자화 인덕턴스의 비선형에 기인한 것으로, 변압기 투입 시 철심의 한쪽 방향으로의 포화와 비포화를 반복하여 차전류가 임계값이상으로 존재하게 되어, 전류차동 계전기의 오동작을 유발한다.

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 철손전류를 고려한 3상 변압기 보호용 전류차동 계전알고리즘을 제안한다. 제안한 방식은 철손저항과 계산한 유기전압을 이용하여 철손 전류를 계산한다. 또한, 자화곡선과 계산한 자속으로부터 자화 가지로 흐르는 자화 전류를 계산한다. 그 다음에 1차전류에서 자화전류, 철손 전류, 2차전류를 빼서 차전류를 구하여, 내부사고를 구분하는 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 상만 따로 그리면 그림 2와 같은 변압기 등가회로로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 그림 2의 등가회로에서  $R_c, R_1, L_A$ 는 주어진다 가정하였다.

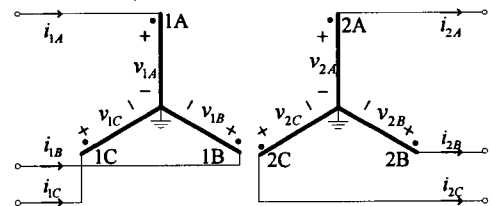
기존의 전류차동 계전방식은 식 (1)과 같이 차전류를 구하였다. 따라서, 변압기 철심으로 흐르는 철손전류와 자화 전류는 계산할 수 없었기 때문에, 여자돌입 또는 과여자에서 오동작하였다.

$$i_d = i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 \tag{1}$$

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

$$i_d = i_1 - \frac{N_2}{N_1} i_2 - i_c - i_m \tag{2}$$

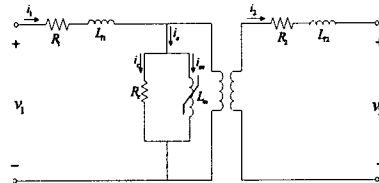
이하에서는  $i_c$ 와  $i_m$ 을 추정하는 방식을 기술한다.



$v_{1A} v_{1B} v_{1C}, v_{2A} v_{2B} v_{2C}$  : 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 누설인덕턴스

$R_c$  : 철손저항,  $L_m$  : 자화인덕턴스

$i_e$  : 여자전류,  $i_c$  : 철손전류,  $i_m$  : 자화전류

그림 2 한 상의 변압기 등가회로

### 2.1 철손전류 $i_c$ 추정

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

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

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_1 \quad (3)$$

$e_1$ 에 대해 식 (3)을 정리하면 식 (4)가 된다.

$$e_1 = v_1 - (R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}) \quad (4)$$

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

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

### 2.2 자화전류 $i_m$ 추정

식 (5)로부터  $e_1$ 을 구했으므로, 자속은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda = \int_0^T e_1 dt + \lambda_0 \quad (6)$$

여기서,  $\lambda_0$ 는 초기 자속이다. 본 논문에서는  $\lambda_0 = 0$ 라고 가정하였다.

자화전류를 추정하기 위한 자화곡선은 변압기 철심의 히스테리시스 곡선으로부터 구하였으며, 그림 3에 나타나 있다.

그림 3의 자화곡선과 식 (6)으로부터 계산한 자속으로부터 변압기가 비포화일 때나, 포화되는 경우에  $i_m$ 를 추정할 수 있다.

본 논문에서는 그림 3에서 표현한 것처럼 자화곡선을 구간선형화하여 자화전류를 추정하였다.

계산한 자속을 해당되는 구간에 대입하면, 그 자속을 유기하는 자화전류를 구할 수 있다.

### 2.3 제안한 방식

제안한 전류차동 알고리즘은 식 (2)의 차전류의 기본과 성분을 구하고, 억제전류의 기본과 성분은 식 (7)을 이용해서 구한다.

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (7)$$

제안한 방식은 차전류에 포함되어 있는 고조파 전류에 무관하므로, 비율 전류차동 계전기 특성을 사용할 수 있으며, 이를 식 (8)에 나타내었다.

$$I_d \geq I_{offset} + KI_r, \quad K=0.4, \quad I_{offset} \leq 0.2I_1 \quad (8)$$

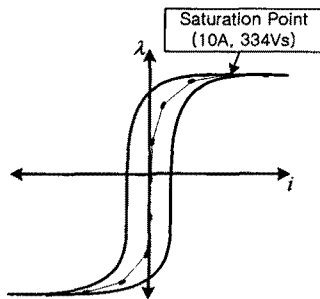


그림 3 히스테리시스 루프와 구간선형화한 자화곡선

### 3. 사례 연구

그림 4와 같은 계통을 선택하였다. 사용한 변압기는 3상 Y-Y 154kV/22kV, 55[MVA]이고, 전원 용량은 6[GVA] 부하용량은 55[MVA] 역률 0.9이다. 변압기 내부사고 모델링은 참고문헌 [3]의 방식을 이용하였다. 주기 당 샘플 수는 32샘플로 하였다. 저역 통과 필터를 설계하여, 모든 전압, 전류를 통과시켰다. 사례연구에서의 결과는 A상의 경우만 표시하였다.

여자돌입, 과여자, 내부사고, 외부사고에 대하여 제시한 방식의 성능을 검증하였다.

#### 3.1 여자돌입

그림 5는 무부하일 때, 투입 위상각 0도일 때의 결과를 보여준다. 그림 5a에 나타난 바와 같이, 2차 전류는 0이다. 기존의 차전류는 단순히 1차 전류에서 2차 전류를 빼므로 차전류가 많이 발생하게 되므로, 기존의 전류차동 계전기는 동작영역안으로 진입하게 된다. 하지만 제안한 방식에서는, 1차 전류에서 2차 전류, 철손전류, 자화전류를 빼서 구하므로, 그 값이 매우 적음을 알 수 있다. 따라서, 제안한 전류차동 방식은 그림 5b에 나타난 바와 같이 동작영역 안으로 진입하지 않게 된다.

#### 3.2 과여자

그림 6은 1차 정격전압의 1.5배, 투입 위상각 0도인 과여자 경우를 모의하였다. 과전압 운전으로 인해 자화전류가 커졌음을 알 수 있고, 기존의 전류차동 방식은 차전류가 존재하게 되어 동작영역 안으로 진입함을 알 수 있다. 하지만 제안한 방식에서 구한 차전류는 작기 때문에, 동작영역안으로 들어가지 않음을 알 수 있다.

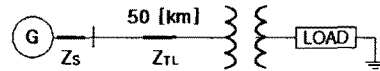
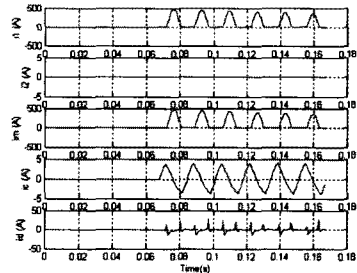
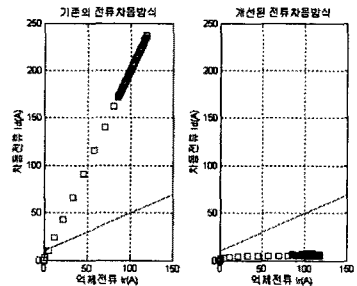


그림 4 모델 계통

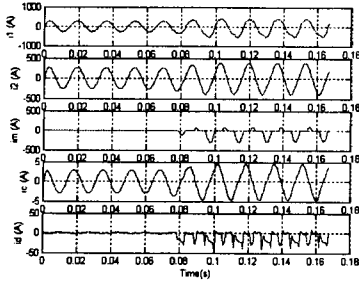


(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형

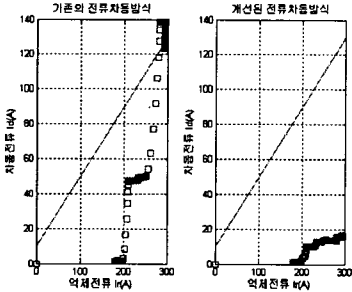


(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 5 여자돌입 (무부하 시)



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형

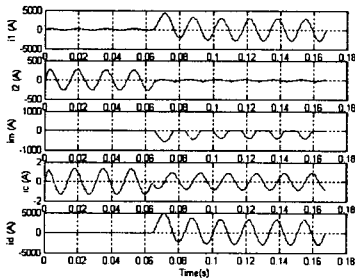


(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

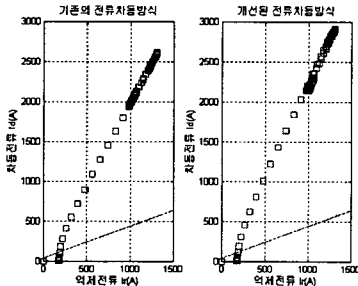
그림 6 과여자

### 3.3 내부사고

그림 7은 사고 위상각 0도에서 1차 권선의 80%지점 지락사고의 경우의 기존 방식과 제안한 방식의 결과를 나타내었다. 그림 7의 지락사고 시에는 사고점에서 1차 전류가 크게 증가하는데 반해, 2차전류는 거의 0이 되므로 기존의 전류차동 방식과 제안한 방식에서, 계전기가 올바르게 동작하였다. 지락사고 시의 철심의 포화로 인한 차전류 값이 적기 때문이다.



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형

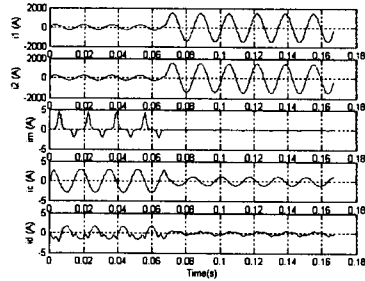


(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

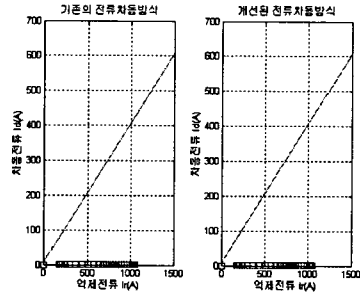
그림 7 내부사고 (80% 지락사고)

### 3.4 외부사고

그림 8은 변압기 2차측, 부하 앞단에서, 사고 위상각 0도인 단락사고를 나타낸다. 기존의 전류차동방식과 개선된 전류차동 방식 모두 동작하지 않았음을 보여준다.



(a) 1차, 2차, 자화, 철손, 차전류 파형



(b) 비율전류차동 계전기의 동작 특성

그림 8 외부사고

## 4. 결론

본 논문에서는 변압기 철심의 비선형 특성을 고려한 3상 변압기 보호용 전류차동 계전방식을 제안하였다. 제안한 방식은 철손저항과 유기전압으로부터 철손전류를 계산하고, 자화곡선과 자속으로부터 자화전류를 계산하여, 기존의 차전류에서 상기 두 전류를 빼서, 차전류를 구하였다.

여자돌입, 과여자, 내부사고, 외부사고의 경우에 알고리즘의 성능을 시험한 결과, 내부사고와 외부사고의 경우에는 기존 계전기와 같은 성능을 보였으며, 여자돌입과 과여자의 경우에는 우수한 성능을 보였다.

### 감사의 글

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

### [참고 문헌]

- [1] 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
- [2] A. G. Phadke, J.S. Thorp, "A New computed-based flux-restrained current differential relay for power transformer protection " IEEE Trans. on PWRD. vol.102, no.11, pp 3624-3629, November 1983
- [3] P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PWRD, vol.9, no.2, pp. 690-699, April 1994