

3권선 변압기 순환전류 추정 알고리즘

*강용철, *이미선, *이병은, *장성일, **김용균
*전북대학교 ***(주)한국IED ENG

Estimation of a circulating current of a three-phase Y-Y-Δ transformer

*Yong-Cheol Kang, *Mi-Sun Lee, *Byung-Eun Lee, *Sung-Il Jang, **Yong-Gyun Kim
*Chonbuk National University **Hankook IED Eng. Inc.

Abstract - In the case of the transformers including the delta winding such as a three-phase Y-Y-Δ transformer, a delta winding current flows in the delta windings. The delta winding current of a three-phase Y-Y-Δ transformer is decomposed into a non-circulating current and a circulating current. The former can be estimated directly from the line currents, but the latter can not. This paper proposes an estimation method for a circulating current of a Y-Y-Δ Transformer. A first order differential equation for the circulating current is derived by applying the Kirchhoff's voltage law on the loop of the delta side. The circulating current can be estimated by solving the differential equation. Various test results indicate the algorithm can estimate the circulating current accurately even under over-excitation and magnetic inrush.

1. 서 론

변압기 보호에 널리 쓰이는 고조파 블로킹 전류차동 계전기는 내부사고 시 동작시간이 지연되는 단점을 가진다. 이를 극복하고자, 변압기 모델에 기초한 보호 방식이 제안되었다[1][2]. 이 방식은 시간영역에서 동작하기 때문에 동작속도가 매우 빠르다. 그러나 변압기 모델 기반 보호 방식은 델타 권선의 순환성분을 추정하는데 어려움이 따른다.

델타 권선의 순환성분은 전류차동 계전기의 감도를 떨어뜨린다. 765kV 변전소에서는 전류차동 계전기의 감도를 높이고자 권선전류를 측정하기 위한 변류기를 변압기 내부에 설치한다. 이는 변압기 제작비용을 상승시키고, 변압기 크기를 증가시키는 원인이 된다. 따라서 델타 권선 측의 순환성분 추정은 변압기 보호용 전류차동 계전기의 신뢰도를 향상시킬 뿐만 아니라, 초고압 계통에서 변압기 제작비용을 감소시키는 효과를 가져온다.

본 논문은 3상 Y-Y-Δ 변압기 델타 권선 측의 순환성분을 추정하는 알고리즘을 제안한다. 권선 전류는 비순환성분과 순환성분으로 나눌 수 있다[1][2]. 비순환성분은 선전류로부터 계산할 수 있다. 그러나 순환성분은 선전류로부터 직접 계산할 수 없다. 순환성분을 구하기 위해 변압기 델타권선 측 루프에 전압 방정식을 적용하면 순환성분에 관한 미분방정식이 유도된다. 이 미분방정식을 풀면 순환성분의 값을 추정할 수 있다. 이 논문에서 제안한 알고리즘이 과여자, 여자돌입 시에도 정확하게 순환성분을 추정할 수 있음을 사례연구를 통해 보였다.

2. 변압기 Δ결선의 순환성분 추정방법

2.1 3상 3권선 Y-Y-Δ 변압기

이 논문에서는 3상 Y-Y-Δ 변압기의 델타 권선 측 순환성분을 추정하였다. 그림 1은 3상 Y-Y-Δ 변압기의 결선도이다. 본 논문에서 사용한 변수와 파라미터들은 표 1과 같다.

<표 1> 변수와 파라미터

기 호	의 미
$v_{1A}, v_{1B}, v_{1C}, v_{2A}, v_{2B}, v_{2C}, v_{3AB}, v_{3BC}, v_{3CA}$	1,2,3차 측 권선의 전압
$i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}, i_{2A}, i_{2B}, i_{2C}, i_{3AB}, i_{3BC}, i_{3CA}$	1,2,3차 측 권선의 전류
i_{3A}, i_{3B}, i_{3C}	3차 측 선전류
$R_{1A}, R_{1B}, R_{1C}, R_{2A}, R_{2B}, R_{2C}, R_{3AB}, R_{3BC}, R_{3CA}$	1,2,3차 측 권선저항
$L_{1A}, L_{1B}, L_{1C}, L_{2A}, L_{2B}, L_{2C}, L_{3AB}, L_{3BC}, L_{3CA}$	1,2,3차 측 누설인덕턴스
$e_{1A}, e_{1B}, e_{1C}, e_{2A}, e_{2B}, e_{2C}, e_{3AB}, e_{3BC}, e_{3AC}$	1,2,3차 측 유기전압
$i_{p3A}, i_{p3B}, i_{p3C}, i_{\Delta}$	비순환성분, 순환성분
N_1, N_2, N_3	1,2,3차 측 권선수

2.2.1 변압기 Δ결선의 순환성분 추정방법

3상 Y-Y-Δ 변압기 3차 측의 전압들은 식(1)~(3)과 같이 표현된다.

$$v_{3AB} = R_{3AB}i_{3AB} + L_{3AB}\frac{di_{3AB}}{dt} + e_{3AB} \quad (1)$$

$$v_{3BC} = R_{3BC}i_{3BC} + L_{3BC}\frac{di_{3BC}}{dt} + e_{3BC} \quad (2)$$

$$v_{3CA} = R_{3CA}i_{3CA} + L_{3CA}\frac{di_{3CA}}{dt} + e_{3CA} \quad (3)$$

변압기의 델타 권선전류 $i_{3AB}, i_{3BC}, i_{3CA}$ 는 순환성분과 비순환성분로 나누어진다.

$$i_{3AB} = i_{p3A} + i_{\Delta}, i_{3BC} = i_{p3B} + i_{\Delta}, i_{3CA} = i_{p3C} + i_{\Delta} \quad (4)$$

[1]에 의하여 비순환성분은 다음과 같이 선전류로부터 직접 구할 수 있다.

$$i_{p3A} = \frac{i_{3B} - i_{3A}}{3}, i_{p3B} = \frac{i_{3C} - i_{3B}}{3}, i_{p3C} = \frac{i_{3A} - i_{3C}}{3} \quad (5)$$

그런데 비순환성분 i_{Δ} 는 선전류로부터 직접 구할 수 없다. 본 논문은 i_{Δ} 를 추정하는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 표현의 편의성을 위해 $R_{1A} \approx R_{1B} \approx R_{1C} \approx R_1, L_{1A} \approx L_{1B} \approx L_{1C} \approx L_1, R_{2A} \approx R_{2B} \approx R_{2C} \approx R_2, L_{2A} \approx L_{2B} \approx L_{2C} \approx L_2, R_{3AB} \approx R_{3BC} \approx R_{3CA} \approx R_3, L_{3AB} \approx L_{3BC} \approx L_{3CA} \approx L_3$ 으로 가정한다. 변압기 1차 측에 키르호프의 전압 방정식을 적용한 후, 유기전압에 대해 다시 쓰면 다음과 같다.

$$e_{1A} = v_{1A} - R_{1A}i_{1A} - L_{1A}\frac{di_{1A}}{dt} \quad (6)$$

$$e_{1B} = v_{1B} - R_{1B}i_{1B} - L_{1B}\frac{di_{1B}}{dt} \quad (7)$$

$$e_{1C} = v_{1C} - R_{1C}i_{1C} - L_{1C}\frac{di_{1C}}{dt} \quad (8)$$

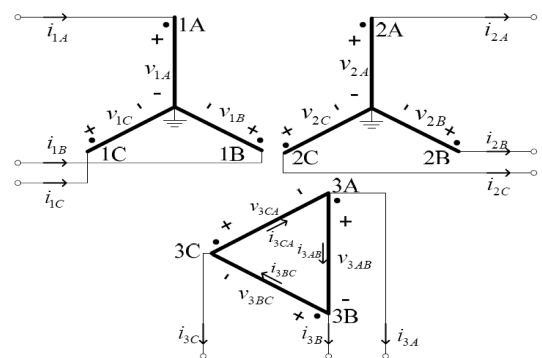
e_{1A}, e_{1B}, e_{1C} 는 식(6)~(8)를 이용하여 구할 수 있다. 식(1)~(3)를 더하여 단자전압의 합에 대해 다시 쓰면 다음과 같다.

$$e_{3AB} + e_{3BC} + e_{3CA} = -L_3\frac{d(3i_{\Delta})}{dt} - R_3(3i_{\Delta}) \quad (9)$$

$e_{3AB}, e_{3BC}, e_{3CA}$ 는 식(6)~(8)와 식(10)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{e_{3AB}}{e_{1A}} = \frac{N_3}{N_1}, \frac{e_{3BC}}{e_{1B}} = \frac{N_3}{N_1}, \frac{e_{3CA}}{e_{1C}} = \frac{N_3}{N_1} \quad (10)$$

앞에서 구한 $e_{3AB}, e_{3BC}, e_{3CA}$ 를 이용하여 식(9)에 대입하여 풀면 i_{Δ} 를 구할 수 있다. 따라서 3차 측 델타 권선전류 $i_{3AB}, i_{3BC}, i_{3CA}$ 를 식(4)로부터 얻게 된다.



<그림 1> 3상 Y-Y-Δ 변압기

3. 사례 연구

그림 2는 본 논문에서 모의한 단상 계통도이다. 3상 Y-Y-Δ 변압기 (345kV/154kV/23kV, 500MVA)는 EMTP를 이용하여 모델링 하였다. 샘플링 주파수는 주기당 32샘플이다. 철심의 히스테리시스 특성은 type96 소자를 이용하여 모델링 하였고, 포화점은 (100A, 822Vs)을 선택하였다. 또한 컷을 주파수가 960Hz인 바터워스 2차 저역통과필터가 사용되었다. 제한한 알고리즘의 성능은 과여자, 여자돌입 조건에서 모의되었다. 본 논문에서는 추정한 순환성분을 이용하여 구한 델타 권선전류와 실제 델타 권선전류의 차이를 퍼센트 오차로 정의한다.

$$error_{3AB} = \frac{i_{3AB} - i_{3ABcorrect}}{I_{3AB}} \times 100 \quad (11)$$

여기서 I_{3AB} 는 i_{3AB} 의 최대값이다.

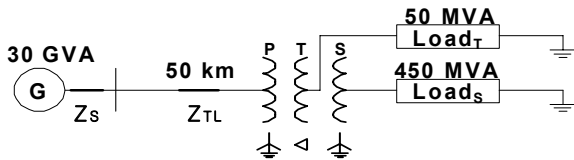
3.1 과여자

변압기 1차 측에 정격 전압의 150%인 517.5kV의 전압을 50.2ms에 인가하였다.

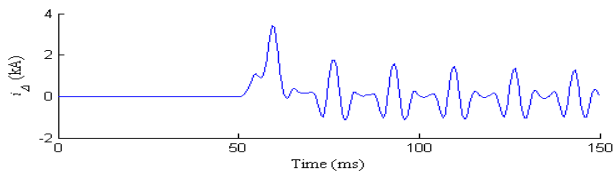
그림 3과 4는 과여자시의 추정 결과를 나타낸다. 그림 3(a)는 과여자시에 큰 순환 전류가 발생함을 보여준다. 그림 3(b)는 과여자로 인해 크기가 증가한 비순환성분을 나타낸다. 그림 4(a)는 추정한 순환성분을 이용하여 얻은 델타 권선전류와 실제 전류를 나타낸다. 실선은 추정한 순환성분을 이용하여 얻은 델타 권선전류를, 점선은 실제 전류를 의미한다. 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 알고리즘은 순환성분을 추정하여 델타 권선전류를 오차 범위 5% 이내에서 정확하게 구하였다.

3.2 여자돌입

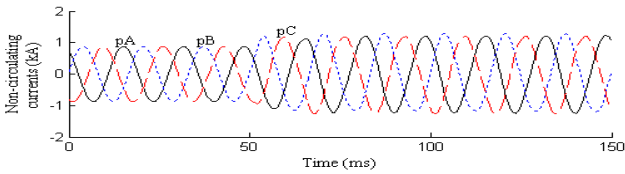
여자돌입은 투입위상각 0도, 잔류자속 80%, 무부하 조건에서 생성되었다.



<그림 2> 단상 계통도

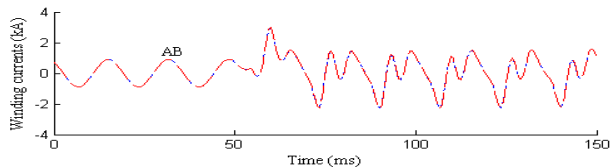


(a) 순환성분

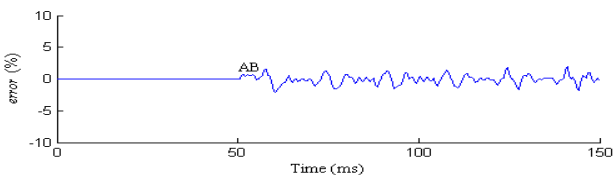


(b) 비순환성분

<그림 3> 과여자시의 순환성분과 비순환성분

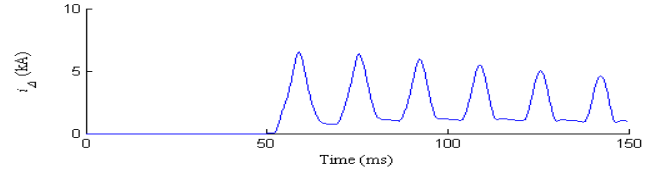


(a) 추정한 델타 권선전류와 실제 델타 권선전류

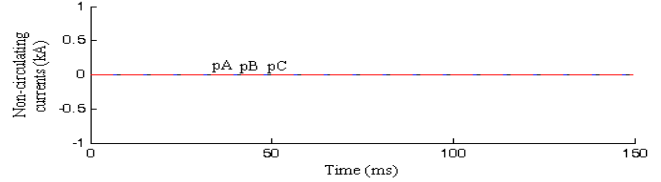


(b) 추정한 델타 권선전류와 실제 델타 권선전류의 오차

<그림 4> 과여자시 순환성분 이용하여 구한 델타 권선전류의 오차

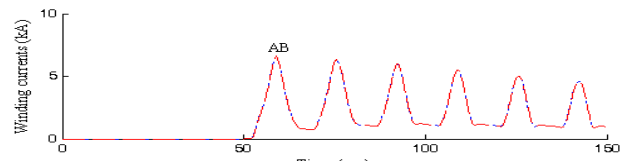


(a) 순환성분

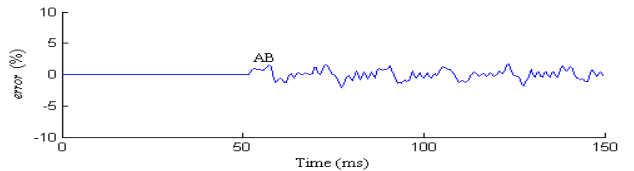


(b) 비순환성분

<그림 5> 여자돌입시의 순환성분과 비순환성분



(a) 추정한 델타 권선전류와 실제 델타 권선전류



(b) 추정한 델타 권선전류와 실제 델타 권선전류의 오차

<그림 6> 여자돌입시 순환성분 이용하여 구한 델타 권선전류의 오차

그림 5와 6은 여자돌입시의 결과를 보여준다. 그림 5(a)에서 순환성분은 변압기가 투입된 이후에 발생함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 비순환성분이 A, B, C상 모두 0이 됨을 보여준다. 이는 여자돌입이 무부하 상태에서 모의되었기 때문이다. 따라서 델타 권선전류는 모두 순환성분이 된다. 그림 6(a)는 추정한 순환성분을 이용하여 얻은 델타 권선전류와 실제 전류를 의미한다. 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 알고리즘은 순환성분을 추정하여 델타 권선전류를 오차 범위 5% 이내에서 정확하게 구하였다.

4. 결론

본 논문은 3상 Y-Y-Δ 변압기 델타 권선 측의 순환성분을 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 델타 권선 측의 권선전류는 비순환성분과 순환성분으로 나누어진다. 비순환전류는 델타 권선 측의 선전류로부터 직접 구할 수 있다. 그러나 순환성분은 선전류로부터 직접 구할 수 없다. 순환성분은 델타 권선 측에 키로 호프의 전압법칙을 적용하여 얻어진, 권선전류에 대한 일차 미분방정식을 풀어서 추정할 수 있다.

본 논문은 제안한 알고리즘이 과여자, 여자돌입 시에 순환성분을 정확하게 추정하는지 모의하였다. 모의 결과는 추정한 순환성분을 이용하여 구한 델타 권선전류와 실제 델타 권선전류가 5%이내의 오차를 갖는 것을 알 수 있다. 이 결과는 본 논문에서 제안한 알고리즘이 과여자 및 여자돌입 상황에서도 정확하게 순환성분을 추정하여 델타 권선전류를 구할 수 있음을 나타낸다.

[참고 문헌]

[1] 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, July 1989.
 [2] Y. C. Kang, B. E. Lee, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Transformer protection based on the increment of the flux linkages," IEE proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 4, July 2004, pp. 548 - 554.