

Y-Δ 변압기의 순환전류 추정방법

*강용철, *이미선, *이병은, **장성일 **김용균
*전북대학교, ** (주)한국 IED

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

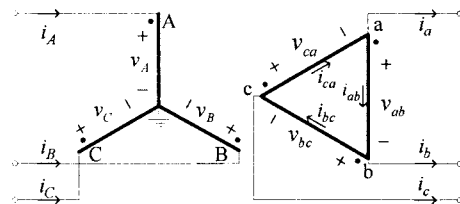
*Yong-Cheol Kang, *Mi-Sun Lee, *Byung-Eun Lee, *Sung-Il Jang, **Young-Geun Kim
*Chonbuk National University, **Hankook IED

Abstract - This paper proposes an estimation method for a circulating current of a Y-Δ Transformer. The delta winding current can be decomposed into the two components i.e. a non-circulating component and a circulating component. The former can be estimated using the line currents. However, the latter can not be estimated directly using the line currents. A first order differential equation for the circulating current is derived by applying the Kirchoff's voltage law on the loop of the delta side. The circulating current can be estimated by the solving the differential equation. The performance of the proposed algorithm is investigated under various conditions including magnetic inrush and over-excitation. The algorithm can estimate the circulating current very accurately even under magnetic inrush and over-excitation.

건에서도 본 알고리즘을 이용하여 순환전류를 정확하게 추정할 수 있음을 보였다.

2. 변압기 Δ결선의 권선전류 추정방법

2.1 변압기 Δ결선의 권선전류 추정방법



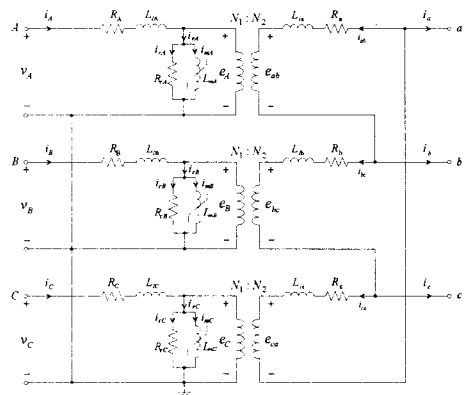
$U_A, U_B, U_C, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$: 각 상의 1차, 2차 전압
 i_A, i_B, i_C : 각 상의 1차 전류
 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} : 각 상의 2차 권선전류
 i_a, i_b, i_c : 각 상의 2차 선전류
 (a) 3상 Y-Δ 변압기

1. 서 론

변압기 보호 계전기는 내부사고를 여자돌입 및 과여자 등과 정확하게 구분할 수 있어야 하며, 이에 전류차동 계전기가 널리 이용되어 왔다. 변압기 보호용 전류차동 계전기의 경우 여자돌입이나 과여자 시에 크게 증가하는 자화전류를 고려할 수 없어 전류차동 계전기가 오동작하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 동작 전류에 포함되어 있는 고조파 성분을 이용하여 계전기의 출력을 억제하는 방식을 사용하고 있다. 이 방식은 오동작을 방지할 수 있지만, 내부사고시 계전기의 동작시간이 증가하는 단점이 있다[1, 2].

이러한 고조파 억제 전류차동 계전기의 단점을 극복하고자, 변압기 모델에 기초한 보호 방식이 제안되었다[3, 4]. 이 방식들은 시간영역에서 동작하기 때문에 속도가 매우 빠르다. 하지만, 이 방식들은 변압기 양단의 전류와 양단의 전압이 필요하고 특히 [3]의 방식은 순환전류를 추정하기 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 Y-Δ 변압기 보호를 위해 순환전류를 추정하여 델타 권선전류 구하는 방법에 대해 기술한다. 델타 권선전류는 비순환 성분과 순환 성분으로 나눌 수 있다. 비순환 성분은 선전류로부터 계산할 수 있다. 그러나 순환성분은 선전류로 직접 계산할 수 없다. 순환성분을 구하기 위해 변압기 델타권선 측 루프에 전압 방정식을 적용하면 순환전류에 관한 미분방정식이 유도된다. 그 미분 방정식을 풀면 순환전류의 값은 추정된다. 정상상태와 여자돌입, 외부사고, 과여자 와 같은 과도상태에 대해 제안한 방식을 적용하였다. 그 결과로서 다양한 조



$e_A, e_B, e_C, e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}$: 1차, 2차 각 상의 유기전압
 $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$: 1차, 2차 각 상의 권선저항
 $L_{lA}, L_{lB}, L_{lC}, L_{lA}, L_{lB}, L_{lC}$: 1차, 2차 각 상의 누설 인덕턴스
 R_{cA}, R_{cB}, R_{cC} : 각 상의 철손저항
 L_{mA}, L_{mB}, L_{mC} : 각 상의 자화 인덕턴스
 N_1, N_2 : 1차, 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 등가회로

그림 1에 3상 Y-Δ 변압기와 이의 등가회로를 나타내었다. 변압기의 1차측 유기전압을 e_A, e_B, e_C , 2차측 유기전압을 e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} 라고 하여 전압 전류 관계식을 정리하면 식 (1)~(6)과 같다.

$$e_A = v_A - R_A i_A - L_A \frac{di_A}{dt} \quad (1)$$

$$e_B = v_B - R_B i_B - L_B \frac{di_B}{dt} \quad (2)$$

$$e_C = v_C - R_C i_C - L_C \frac{di_C}{dt} \quad (3)$$

$$e_{ab} = v_{ab} - R_{ab} i_{ab} - L_{ab} \frac{di_{ab}}{dt} \quad (4)$$

$$e_{bc} = v_{bc} - R_{bc} i_{bc} - L_{bc} \frac{di_{bc}}{dt} \quad (5)$$

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

변압기 2차 권선전류인 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 는 각각 두 성분으로 나눌 수 있다. 한 성분은 비 순환전류성분 i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} 이고, 다른 한 성분은 순환전류성분 i_s 이다. 델타 권선전류를 비 순환전류성분과 순환전류성분의 합으로 표현하면 식(7)과 같다.

$$i_{pa} = i_{pa} + i_s, \quad i_{pb} = i_{pb} + i_s, \quad i_{pc} = i_{pc} + i_s \quad (7)$$

비 순환전류성분은 참고문헌[3]을 이용하여 식 (8)을 추정할 수 있다.

$$i_{pa} = \frac{i_b - i_a}{3}, \quad i_{pb} = \frac{i_c - i_b}{3}, \quad i_{pc} = \frac{i_a - i_c}{3} \quad (8)$$

하지만, 순환전류성분 i_s 는 획득 가능한 선전류로부터 직접 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서 i_s 를 추정하는 방식을 제안한다. 기술의 편의성을 위해 $R_A \approx R_B \approx R_C = R_1$, $L_{1A} \approx L_{1B} \approx L_{1C} = L_{11}$, $R_{ab} \approx R_{bc} \approx R_{ca} = R_2$, $L_{1ab} \approx L_{1bc} \approx L_{1ca} = L_{12}$ 이라고 가정한다. 식 (4)~(6)을 더하여 전압 전류의 평형을 이용하면 식 (9)와 같다.

$$e_{ab} + e_{bc} + e_{ca} = -R_2(3i_s) - L_{12} \frac{d(3i_s)}{dt} \quad (9)$$

여기에서 변압기 1차 각 상의 유기전압 e_A, e_B, e_C 는 식 (1)~(3)로부터 구할 수 있다. 변압기 2차 각 상의 유기전압 e_{ab}, e_{bc}, e_{ca} 는 e_A, e_B, e_C 와 변압기의 권선비를 고려한 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{e_A}{e_{ab}} = \frac{e_B}{e_{bc}} = \frac{e_C}{e_{ca}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

따라서 식 (9)의 좌변은 식 (1)~(3)과 식 (10)으로부터 계산할 수 있으므로, i_s 는 식 (9)로부터 추정할 수 있다.

3. 사례 연구

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 모델 계통을 선택하였다. 3상 Y-Δ 변압기 (154kV/13kV, 55 MVA)를 EMTP를 이용하여 모델링하였고, 샘플링 비율은 주기당 64샘플을 사용하였다. 변압기 철심의 히스테리시스 특성을 모델링하기 위하여 type-96소자를 사용하였고, HYSYD를 사용하기 위한 포화점은 (40A, 333.754Vs)를 사용하였다. 지역 통과필터는 저지대역 컷오프 주파수를 1920 Hz인 Butterworth 2차 필터를 설계하여, 전압과 전류를 통과시켰다.

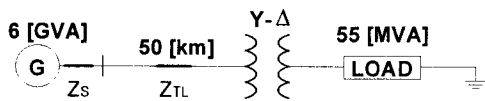
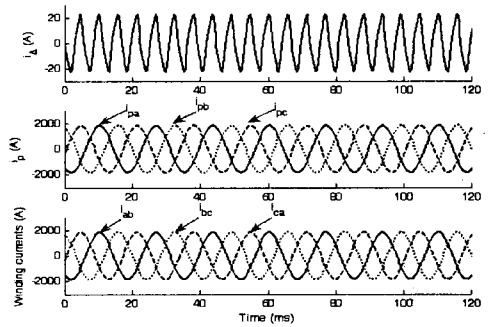


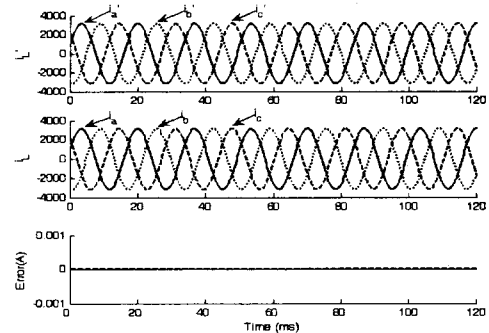
그림 2 모델 시스템

3.1 정상상태에서의 순환전류 추정

Y-Δ 변압기의 순환전류는 정상상태 시에도 지속적으로 변압기 델타 권선 측에 흐르게 된다. 이 순환전류는 변압기의 열화를 가져와 변압기를 노후하게 만든다. 그림 3은 정상상태에서의 순환전류를 추정한 결과이다. 그림3 (a)에서 순환전류는 약 20A로 정격전류의 약 1%의 값을 가진다. 순환전류는 작은 값을 가지더라도 시간이 흐를수록 변압기의 손실을 증가시킨다. 이것은 변압기 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 그림3 (b)는 추정한 순환전류의 정확도를 판별한 결과이다. EMTP로 모델링한 변압기 2차측 출력 선전류 i_L 과 본 논문에서 제시한 방식을 이용하여 추정한 출력 선전류 i_L' 이 같으므로 제안한 방식이 순환전류를 정확하게 추정하였음을 알 수 있다.



(a) 정상상태의 순환전류 추정



(b) 추정한 순환전류의 정확도 판별
그림3 정상상태에서의 순환전류

3.2 과도상태에서의 순환전류 추정

여자돌입, 외부사고, 과여자과 같은 과도상태에서의 순환전류를 추정하였다

3.2.1 여자돌입

여자전류의 크기는 투입위상각, 잔류자속, 부하 등에 따라 달라지므로, 파라미터를 변경하여 잔류자속의 크기 변화에 따른 다양한 여자돌입의 경우를 모의하였다.

1) 사례 1: 투입 위상각 0도, 잔류자속 00%, 무부하

2) 사례 2: 투입 위상각 0도, 잔류자속 80%, 무부하

그림 4는 사례 1에 대해 모의한 결과이다. 비선형 철심의 포화는 그림 4와 같은 순환전류를 발생시킨다. 순환전류의 피크값은 약 2300A로, 정격전류보다 약간 큰 값을 가진다. 무부하임으로 비순환 전류 성분은 0이며, 따라서 순환전류가 델타 권선 전류가 된다.

그림 5는 사례 2에 대해 모의한 것이다. 순환전류의 피크값은 약4250A이고, 잔류자속이 존재하지 않을 시 보

다 2배가량 크다. 또한 정격전류보다 2배가량 큰 값이다. 무부하이기 때문에 비순환 전류 성분은 0이고, 순환전류가 곧 델타 권선 전류이다.

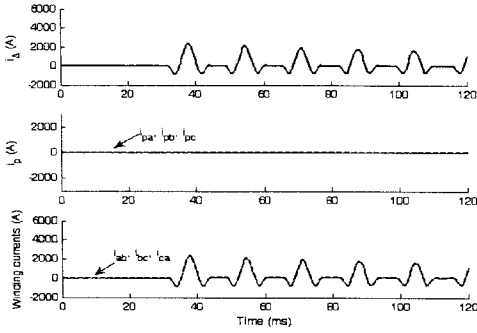


그림 4 잔류자속0% 무부하 여자돌입 시

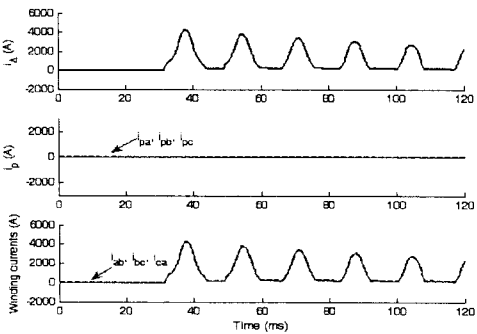


그림 5 잔류자속80% 무부하 여자돌입 시

3.2.2 외부사고

변압기 1차 권선의 A상에 외부사고를 모의하여, 제안한 방식이 순환전류 성분을 정확하게 추정할 수 있는지 시험하였다.

1) 사례 3: 변압기로부터 5km, 0도 지락사고

그림 7은 사례 3에 대해 모의한 것이다. 외부사고 발생 시 변압기에 큰 순환전류가 흐름을 알 수 있다. 순환전류의 피크값은 약9000A로, 여자돌입 시에 비해 매우 큰 값을 갖는다. 또한 이 값은 정격전류의 약 4.5배가량 된다. 외부사고로 인해 A상의 비순환 전류 성분은 약 50%가량 감소하였다. 순환전류와 감소한 비순환 전류의 합이 델타 권선 전류가 된다.

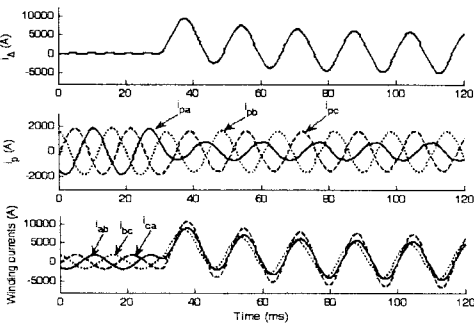


그림 7 사고거리5km, 0도 지락사고 시

3.2.3 과여자

변압기가 과여자 되었을 시 순환전류를 추정하였다.

1) 사례 4: 1차 정격전압의 1.5배의 전압을 인가

그림 7은 사례 4에 대해 모의한 결과를 나타낸다. 1.5배의 과전압이 29.2 ms에 인가되었다. 과여자 시 순환전류의 피크값은 약 2800A이며, 정격전류보다 800A가량 큰 값이다. 델타 권선 전류는 순환전류와 비순환 전류의 합으로 추정할 수 있다.

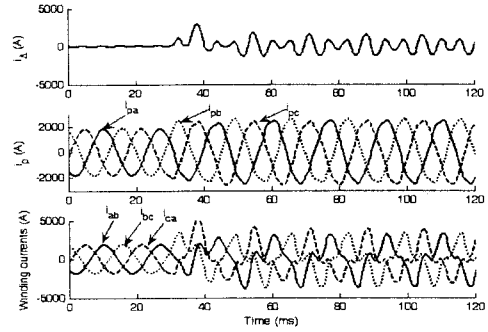


그림 7 정격전압의 1.5배 과여자 시

4. 결 론

본 논문에서는 Y- Δ 변압기의 보호를 위해 순환전류를 추정하여 델타 권선 전류를 구하는 방법을 제안하였다. 본 알고리즘은 변압기 델타권선 측 루프에 전압방정식을 적용하여 순환전류에 관한 미분 방정식을 유도한다. 그 미분 방정식을 풀면 순환전류의 값을 추정할 수 있으며, 실제 측정하기 어려운 변압기 델타권선 전류를 구한다. 정상상태 시와 여자돌입, 외부사고, 과여자와 같은 과도상태 시에 대해 제안한 방식을 적용하였다. 그 결과로서 다양한 조건에서도 순환전류를 정확하게 추정할 수 있음을 보였다.

제안한 방식은 변압기 잔류자속에 영향을 받지 않고, 철심의 비선형성에 의한 히스테리시스 특성에 관계없이 순환전류를 정확하게 추정할 수 있다. 델타 권선 측 순환 전류는 변압기를 열화시켜 노후하게 만든다. 제안한 알고리즘은 Y- Δ 변압기 보호용 전류 자동 계전기의 성능을 향상 시킬 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.H. Einvall, and J.R. Linders, "A Three-phase Differential Relay for Transformer Protection," IEEE Trans. on PAS, vol. 94, no. 6, Nov./Dec. 1975, pp. 1971-1980.
- [2] 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, No v. 1983, pp. 3624-3629.
- [3] 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, July 1989. pp. 1638-1648,
- [4] Y. C. Kang, B. E. Lee, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Transformer protection based on the increment of the flux linkage," IEE proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 4, July 2004, pp. 548-554.