

변압기 병렬운전시 순환전류 추정

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

Estimation of the circulating currents in the parallel operation of transformers

Yong-Cheol Kang*, Mi-Sun Lee*, Byung-Eun Lee*, Sung-Il Jang*, Yong-Gyun Kim**, Haeng-Ro Joo
Chonbuk National University*, Hankook IEDEng. Inc.**, Korea Power Exchange***

Abstract - For the Y-Y-Δ transformers operated in parallel, there exist two kinds of the circulating currents i.e. between the tanks and between the banks of the delta side. The proposed algorithm estimates the two circulating currents in the transformers in parallel in an ultra high voltage system. As the circulating current between the tanks is 90 deg out of phase of the load current, it is estimated by decomposing the line current into the component 90 deg out of phase of the load current. The circulating current between the banks in the delta side is estimated from the delta winding current and the line currents. The performance of the proposed algorithm is investigated when the impedances of the two transformer tanks are different or the taps of the on-load tap changer of the transformers are mismatched temporarily. Test results indicate that the algorithm can estimate the two kinds of the circulating currents successfully for both cases.

1. 서 론

변압기 병렬운전은 초고압이나 특초고압 계통에서 신뢰도 높은 전력을 공급하기 위해 많이 쓰인다. 변압기 병렬운전은 많은 부하를 감당할 수 있게 하고, 변압기의 크기와 손실을 감소시킨다. 게다가, 한 탱크가 가동하지 않아도 다른 한 탱크로 지속적인 전력 공급이 가능하다. 그런데, 변압기 병렬운전을 하기 위해서는 권선비, 임피던스, 저항과 누설 인덕턴스의 비가 같도록 운전해야 한다[1].

변압기 병렬운전시 순환전류는 두 탱크의 임피던스 차이가 있거나, 순간적으로 탭변환기의 탭이 불일치할 경우 발생한다. 순환전류는 변압기 보호계전기의 오동작을 유발하고, 변압기의 열화를 가져온다. 따라서 변압기 병렬운전시 순환전류 추정은 변압기 보호계전기의 성능을 향상시키고, 변압기 열화를 모니터링 할 수 있게 한다. 또한 순환전류는 탭변환기를 제어하기 위한 입력신호로 사용되기 때문에, 정확한 순환전류 추정은 탭변환기 제어에 도움을 준다.

본 논문은 3상 3권선 Y-Y-Δ 변압기 병렬운전시 순환전류 추정 알고리즘을 제안한다. 순환전류는 크게 탱크간 순환전류와 델타결선 측 탱크간 순환전류로 나눌 수 있다. 탱크간 순환전류는 각 탱크에 흐르는 선전류를 변압기 입출력 전류와 동상인 성분과 수직인 성분으로 나누어 추정할 수 있다. 탱크간 순환전류는 델타 결선을 흐르는 선전류의 합이 0이라는 사실과 델타 권선전류로부터 추정할 수 있다. 초고압 계통 이상에서는 보호 계전기의 신뢰성을 높이기 위해 변압기 내부에 변류기를 설치하므로 델타 권선전류를 얻을 수 있다. 본 논문은 탱크간 임피던스 차와 순간적인 탭 불일치로 인해 발생하는 추정한 순환전류를 보였다.

2. 본 론

그림 1은 3상 3권선 병렬 Y-Y-Δ 변압기의 결선을 나타낸다. 여기서 굵은 선은 변압기 1차, 2차, 3차측의 탱크간 순환전류를 나타내고, 회진하는 원은 델타결선 측 탱크간 순환전류를 의미한다.

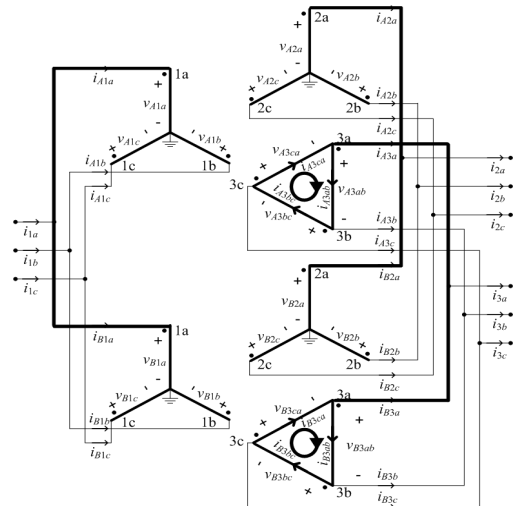
2.1 탱크간 순환전류

변압기 병렬운전시 탱크간 순환전류는 부하쪽으로 나가지 않고, 두 탱크사이를 순환하는 전류를 말한다. 따라서 각 탱크에 흐르는 선전류를 변압기 입출력 전류와 동상인 성분과 수직인 성분으로 나눌 수 있다. 그림 2는 1차측 탱크간 순환전류를 추정하는 페이지도이다. 2차와 3차측 순환전류도 같은 방법으로 추정할 수 있다.

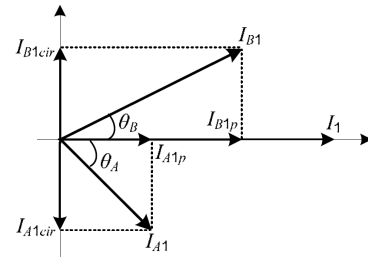
I_1 은 두 탱크의 1차측으로 흐르는 입(출)력전류이고, I_{A1} 과 I_{B1} 의 합이다.

$$I_1 = I_{A1} + I_{B1} \quad (1)$$

각 탱크에 흐르는 선전류 I_{A1} 과 I_{B1} 는 1차측 입력전류와 동상성분인 비순환전류와 수직성분인 순환전류로 나눌 수 있다.



<그림 1> 3상 3권선 병렬 Y-Y-Δ 변압기



<그림 2> I_1, I_{A1}, I_{B1} 에 관한 페이지도

$$I_{A1} = I_{A1p} + I_{A1cir}, I_{B1} = I_{B1p} + I_{B1cir} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 A 탱크와 B 탱크에 흐르는 순환전류의 크기는 같고, 방향은 반대임을 알 수 있다.

$$I_{A1cir} = -I_{B1cir} \quad (3)$$

A, B 탱크를 흐르는 비순환전류와 순환전류는 식 (4), 식(5)와 같이 표현된다.

$$I_{A1p} = (|I_1| \cos \theta_A) \angle I_1, I_{A1cir} = (|I_1| \sin \theta_A) \angle (I_1 - 90^\circ) \quad (4)$$

$$I_{B1p} = (|I_1| \cos \theta_B) \angle I_1, I_{B1cir} = (|I_1| \sin \theta_B) \angle (I_1 - 90^\circ) \quad (5)$$

2.2 탱크간 순환전류

변압기 병렬운전시 탱크간 순환전류는 3차측 델타결선된 탱크들을 순환하는 전류를 말한다. 탱크간 순환전류는 델타결선측 선전류의 합이 0이라는 사실과 권선전류를 이용하여 추정할 수 있다. 초고압 계통 이상에서는 보호 계전기의 신뢰성을 높이기 위해 변압기 3차측 델타결선 내부에 변류기를 설치하므로 델타 권선전류를 얻을 수 있다.

A 탱크의 델타 권선전류 $i_{A3ab}, i_{A3bc}, i_{A3ca}$ 는 식 (6)와 같이 비순환전류와 순환전류로 나눌 수 있다[2]. 또한 델타결선측 선전류의 합은 0이다.

$$i_{A3ab} = i_{A\Delta} + i_{Apab}, i_{A3bc} = i_{A\Delta} + i_{Apbc}, i_{A3ca} = i_{A\Delta} + i_{Apca} \quad (6)$$

$$i_{Apab} + i_{Apbc} + i_{Apca} = 0 \quad (7)$$

식 (6)의 세 식을 합하고 식(7)을 이용하여 $i_{A\Delta}$ 에 대해 정리하면

$$i_{A\Delta} = (i_{A3ab} + i_{A3bc} + i_{A3ca}) \div 3 \quad (8)$$

따라서 델타결선측 탱크간 순환전류는 권선전류로부터 추정할 수 있다. B 탱크의 탱크간 순환전류 또한 같은 방법으로 구할 수 있다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 그림 3과 같은 모델 계통을 연구하였다. 탭변환기를 포함하는 두 대의 3상 3권선 Y-Y- Δ 변압기(765/345/23kV, 1GVA)를 EMTP-RV를 이용하여 모델링 하였다. 샘플링 주파수는 주기당 64샘플이고, 포화점은 62.6A, 1823.7Vs이다.

3.1 탭크간 임피던스 차에 의한 순환전류

변압기 병렬운전시, 두 탭크간 임피던스가 다르면 순환전류가 발생하게 된다. 본 논문에서는 B탱크의 a, b, c상 임피던스가 A탱크의 80%인 경우에 대해 연구하였다.

변압기 병렬운전시 발생하는 탭크간 순환전류는 식 (4)와 (5)를 이용하여 추정할 수 있다. 그 중 3차측 탭크간 순환전류 추정 결과를 표 1에 나타내었다. A탱크의 순환전류 I_{A3cir} 는 $2.209\angle 90^\circ$, B탱크 순환전류 I_{B3cir} 는 $2.209\angle -90^\circ$ 로 크기는 서로 같고, 방향은 반대이다. I_{A3cir} 는 3차측 부하 전류 I_3 의 38%, I_{B3cir} 는 19%가 흐른다.

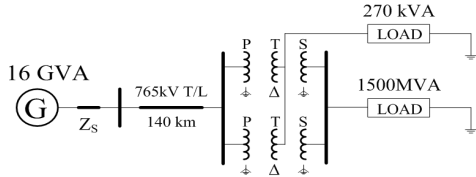
그림 4는 3차측 A탱크의 탭크간 순환전류 추정 결과를 나타낸다. 탭크간 순환전류는 식 (8), 비순환전류는 식 (6)과 추정된 순환전류를 이용하여 얻을 수 있다. A탱크 순환전류의 최대값은 8.099A로, 비순환전류의 110%이다. 임피던스 차에 의해 탭크간 순환전류가 크게 흐르는 것을 의미한다.

3.2 순간적인 탭변환기에 의한 순환전류

변압기 병렬운전시 탭이 변환되는 순간, 두 탭크의 기계적 시간차로 인한 순간적인 탭변환에 의한 순환전류가 발생하는 원인이 된다[3]. 본 논문에서는 A, B탱크의 탭변환 지연시간을 각각 0ms, 100ms로 두었다. 따라서 A탱크는 40ms, B탱크는 140ms에 탭변환하게 된다.

탭변환시 동안 I_3 는 $5.813\angle 0^\circ$, I_{A3} 는 $951.7\angle -43.21^\circ$, I_{B3} 는 $947.5\angle 136.6^\circ$ 가 흐른다. 그림 5는 부하전류 I_3 (녹색)을 기준 전류로 하여 I_{A3} (파란색)과 I_{B3} (빨간색)를 탭크간 비순환전류와 순환전류로 나눈 것이다. 각 탭크에 흐르는 탭크간 순환전류가 크기는 같고 방향이 반대임을 확인할 수 있다. 그림 6은 I_{A3} 에 포함된 I_{A3p} , I_{A3cir} 의 크기와 위상을 나타낸 것이다. I_{A3} ($951.7\angle -43.21^\circ$)에 포함된 I_{A3p} (빨간색)는 $693.7\angle 0^\circ$, I_{A3cir} (녹색)는 $621.6\angle -90^\circ$ 이다. 3차측 A탱크에는 권선전류의 65%에 해당하는 순환전류가 발생했음을 확인할 수 있다.

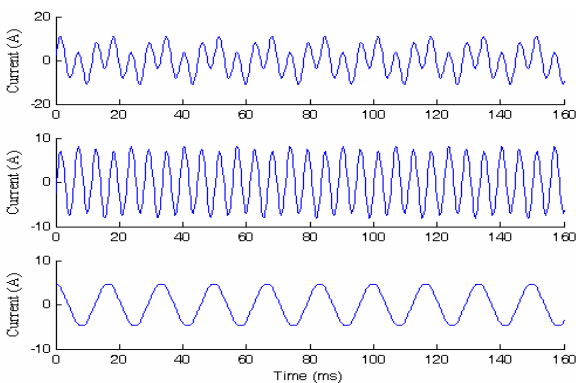
그림 7은 3차측 A탱크의 탭크간 순환전류 추정 결과를 나타낸다. 순환전류의 최대값은 A탱크 8.44A, B탱크 8.35A이다.



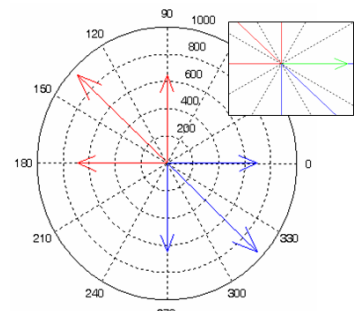
〈그림 3〉 모델 계통

〈표 1〉 3차측 탭크간 비순환전류와 순환전류

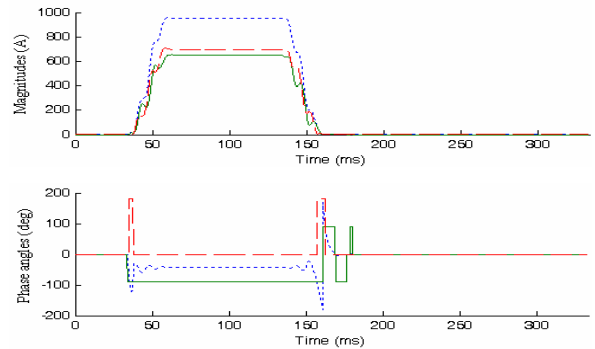
	크기 (A)	위상각 ($^\circ$)		크기 (A)	위상각 ($^\circ$)
I_3	5.823	0			
I_{A3}	5.838	157.8	I_{B3}	11.44	-11.13
I_{A3p}	5.404	180	I_{B3p}	11.23	0
I_{A3cir}	2.209	90	I_{B3cir}	2.209	-90



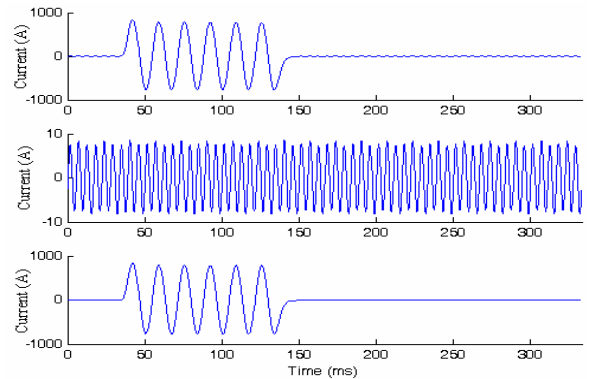
〈그림 4〉 3차측 A탱크의 탭크간 비순환전류와 순환전류: 권선전류(위), 순환전류(중간), 비순환전류(아래)



〈그림 5〉 I_3 , I_{A3} , I_{B3} 에 관한 페이저도



〈그림 6〉 3차측 A탱크의 탭크간 비순환전류와 순환전류: 크기(위), 위상(아래)



〈그림 7〉 3차측 A탱크의 탭크간 비순환전류와 순환전류: 권선전류(위), 순환전류(중간), 비순환전류(아래)

4. 결 론

본 논문은 변압기 병렬운전시 순환전류 추정 알고리즘을 제안한다. 변압기 병렬운전시 발생하는 순환전류에는 탭크간 순환전류와 3차측 델타결선 내부를 순환하는 탭크간 순환전류가 있다. 탭크간 순환전류는 선전류를 입(출)력전류를 기준으로, 동상성분인 비순환성분과 수직성분인 순환전류로 나누어 추정할 수 있다. 탭크간 순환전류는 델타 권선전류와 델타결선측 선전류의 합이 0이라는 사실을 이용하여 추정할 수 있다.

제안한 알고리즘의 성능은 탭크간 임피던스 차에 의한 순환전류 추정과 순간적인 탭변환으로 인한 순환전류 추정을 통하여 검증하였다. 사례 연구 결과 제안한 알고리즘이 위의 두 경우에 대해 순환전류를 성공적으로 추정함을 확인하였다. 제안한 알고리즘은 순환전류 발생으로 인한 변압기 보호계전기의 오동작을 방지할 수 있고, 보다 정확한 탭변환기의 제어 입력신호로 사용될 수 있다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] C. I. Hubert, "Electric machines theory, operation, applications, adjustment, and control", 2nd. Prentice Hall, pp. 104 - 106, 2002.
- [2] 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.
- [3] P. Okanik, B. Kurth, and J. H. Harlow, "An Update on the Paralleling of OLTC Power Transformers", IEEE Transmission and Distribution Conference, Volume 2, p.871 - 875, 1999.