

병렬운전 변압기 전압제어 및 저압측 모션보호방식연구

윤기섭, 백승도, 최중혁  
한국전력공사

A Study of Voltage Control for Lower Side Parallel Transformer

Gi-Seob Yun, Seung-Do Baek, Hyuck-Jong Choi

**Abstract** - Parallel operation scheme to several transformers is adopted because of the load increase, economic problem, or load shedding. For the transformer's parallel operation, loads proportional to each transformer's capacity must be allotted, and circulation currents must be limited as much as without causing any problem in a real operation. But, both transformers in parallel operation can be tripped when either faults at lower voltage side of a transformer or faults in a bus occurs. Therefore, parallel operation scheme to distribution transformers in Korea is not adopted in a normal state but only when loaded or load-shedded. These are due to the insufficiency of the construction in communication network and AVR scheme. Besides that, those are because bus bar protection scheme to lower voltage side of a transformer is not applied. In spite of enormous initial investment costs, advanced countries take so much account of power system reliability and stable supply that they adopt the parallel operation scheme in a normal state. One of the problems in parallel operation is the overheat of transformers due to the excessive circulation currents. This paper presents the scheme that controls voltages between both transformers using circulation currents that occurs in parallel operation.

**Key Words** : AVR, Parallel, Voltage Control Function, LON Bus

1. 서 론

변압기는 부하의 증가, 경제적인 이유 또는 부하전환과 같은 여러 경우에, 여러 대의 변압기를 병렬운전에 필요한 조건으로서 각 변압기가 자기의 용량에 비례하는 부하를 분담하고, 순환전류를 실용상 지장이 없을 정도로 제한한다. 순환전류를 감지하여 병렬운전 변압기간 전압제어를 효과적으로 하고 있다. 반면에, 우리 전력계통의 23kV 변압기 병렬운전은 저압측 고장시 또는 모션고장시 병렬운전중인 양측 변압기가 동시에 Trip되는 과급사고를 방지하기 위하여 정상운전상태에서는 병렬운전을 하지 않으며 가압시, 부하 절체시등 한시적으로만 채택 운전하고 있다. 이는 2차측 모션보호방식(Bus Bar Protection Scheme)의 미적용과 병렬운전 전압제어에 필수적인 Communication Network 및 AVR Scheme 구성이 미흡하기 때문이다. 그러나, 선전국은 무엇보다도 계통의 신뢰도 및 안정적 공급을 우선적으로 고려하기 때문에 막대한 초기 투자비에도 불구하고 상시 변압기를 병렬운전할 수 있는 Scheme을 채택하여 부하공급의 신뢰성을 도모하고 있다. 이에, 선전국의 변압기 병렬운전시 변압기간의 전압제어방법을 검토하여 보고자 한다.

2. 변압기 병렬운전과 순환전류

변압기 병렬운전조건으로서 1,2차의 정격전압 및 극성이

같은 것, 상회전의 방향 및 각변위가 동일할 것, 권선비가 같은 것, 백분율임피던스 전압강하차가 ±10% 이내일 것, 용량비가 3:1이내일 것 등이 있다. 이를 각 항목별로 검토·비교하여 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

2.1 극성에 같지 않을 경우

2대 또는 그 이상의 변압기를 병렬운전할 경우 극성이 같지 않은 변압기가 1대라도 있으면 단락상태와 같이 큰 무효 순환전류가 각 변압기 권선에 순환전류가 흘러 변압기의 소손 등 이상현상을 초래한다. 2대의 변압기를 병렬운전 하는 경우 극성이 서로 같지 않으면 양 변압기에 흐르는 순환전류는  $I_c = \frac{\text{양 변압기의 전압의 Vector 합}}{\text{양 변압기의 권선의 Imp 합}} [A]$  가 흐르며, 3대의 변압기를 3상 Δ-Δ 결선한 경우 1대가 극성이 같지 않으면 순환전류는  $I_{3c} = \frac{2 \times \text{선간전압}}{3 \times \text{변압기의 권선의 Imp}} [A]$  된다.

2.2 전압비가 다른 경우

전압비가 다른 2대의 변압기를 병렬운전하면 2차측에서 두 변압기 간의 차전압이 생기고 2차전압에 의하여 변압기 권선에는 무효순환전류가 흘러 동손을 증가시키고 변압기를 소손시키는 경우가 있다. 이때의 순환전류는  $I_c = \frac{2 \text{대 변압기의 전압차}}{2 \text{대 변압기의 권선의 imp합}}$  가 흐르며, 이 순환전류의 값이 전부하 전류의 ±10% 이내에서는 실용상 지장이 없다고 할 수 있다.

2.3 % Impedance가 다른 경우

지금 각 변압기의 정격전압을  $V_n$ , % Imp를 각각  $\%Z_1, \%Z_2, \dots$  라고 내부 Imp. 를 각각  $Z_1=R_1+jX_1, Z_2=R_2+jX_2, \dots$ ; 정격전류를 각각  $I_{n1}, I_{n2}, \dots$  라고 하면,  $\%Z_1 = \frac{I_{n1} \times Z_1}{V_n} \times 100, \%Z_2 = \frac{I_{n2} \times Z_2}{V_n} \times 100$  로 표시된다. 그런데 부하분담을 각 변압기의 용량 즉, 정격전류에 비례하도록 하기 위하여는  $I_{n1}Z_1=I_{n2}Z_2, \dots$ 가 Vector적으로 같아야 한다. 즉,  $I_{n1}Z_1$ 의 절대치(크기)가 같고 위상이 같도록 해서 2차 단자전압의 크기 및 위상을 같게 하지 않으면 안 된다. 따라서 각 변압기의 %Z 및 %R, %X의 비가 각각 같아야 한다. 그러나 변압기 %R %X의 비는 용량에 따라서 다르며 용량이 클수록 이의 비는 작아지므로 용량 및 냉각 방식이 다른 변압기의 %R와 %X의 비를 같게 한다는 것은 매우 곤란한 일이다. 그러나 %R는 %X에 비하여 매우 작으므로 %Z치만을 비교하여 이것이 같으면 충분하다.

2.4 순환전류 최적배분에 의한 전압제어

이중에서 변압기간 임피던스 및 2차전압 벡터차에 의해서 발생하는 순환전류와 전압제어의 원리는 다음과 같다. 병렬운전에서는 순환전류 원리를 적용하는 것을 기본으로 하고 있다.

병렬전압제어의 두가지의 주목적은 첫째, 선정정(Preset) 목표치 이내로 유지하기 위하여 모션전압이나 부하전압을 조정한다. 둘째, 병렬변압기간의 무효전력을 최적으로 배분키 위하여 순환전류를 최소화시키는 것이다. 첫째목적은 단상변압기 전압제어를 하는 것과 같은 목적이고, 둘째는 각 변압기의 저압측 무부하전압 불평형 때문에 나타나는 순환전류를 수용할 수 있는 값으로 유지하는 것이다. 병렬운전 변압기간의 전압제어모듈간의 통신망(LON Bus)은 그림2.1과 같다. 정상운전상태에서는 Master Transformer로부터 주기적으로 data송신을 받아서 Slave Transformer의 data는 update된다. 그러나, Master Transformer의 Voltage Control Function에 의해서 긴급한(emergency) 메시지가 감지되면 즉시 Slave Transformer에 보내진다. 그림2.2는 변압기간 병렬운전의 한 예를 보여준 것이다. 만일 T1 변압기가 무부하전압이 더 높다면 T1에서의 부하전류에는 증가되는 방향으로 T2에서의 부하전류에는 감소하는 방향으로 순환전류가 만들어진다. 이 같은 경우 순환전류의 크기는 대략 2.1식과 같은 방법으로 계산함을 보여준다.

$$|I_{CC-n}| = |I_{CC-r2}| = \left| \frac{U_{T1} - U_{T2}}{Z_{T1} - Z_{T2}} \right| \quad (2.1식)$$

변압기 임피던스는 거의 인덕턴스 성분이기 때문에 위 공식에 변압기 리액턴스를 바로 적용하여도 무방하다. 이는 동시에 T1 순환전류는 모션전압에 거의 90° 지상인 반면 T2 순환전류는 90° 진상이 되고, 순환전류는 거의 무효성분임을 보여준다. 변압기를 통하여 흐르는 순환전류를 최소화함으로써 총 무효전력의 흐름 역시 최적화 된다. 동시에 최적상태에서는 피상전력흐름은 변압기 정격용량에 비례하여 그룹의 변압기간에 배분된다. 병렬제어에서 Voltage Control Function의 가장 중요한 임무는 순환전류의 계산이다. 이 목적을 달성키 위해서는 변압기간 Communication Bus(i.e LON Bus)를 통하여 정보나 측정자료를 교환할 수 있어야만 한다.

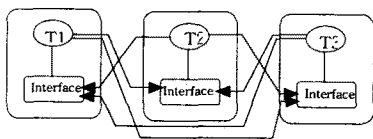


그림 2.1 병렬그룹 변압기간에 통신 network 구성

이는 각 변압기 제어 및 보호장치간에 비동기로 운전함을 변압기간에 전류, 전압, 위상값을 교환하거나 순환전류 계산에 직접적으로 사용치 못함을 의미한다. 병렬그룹내의 모든 변압기간을 동기화하기 위해서, Common reference(기준값)이 선택되어야만 한다. 1개의 병렬그룹에 속한 모든 변압기에 대한 유일하고 적당한 기준값은 모션전압이다. 이는 모션전압이 모든 변압기에 있어서 기준값임을 의미하고, 복소수 평면상에서 전류위상의 위치는 그 값을 기준으로 계산한다. Voltage Control Function을 위한 변압기간의 동기화를 위하여 어떤 부가적인 필요가 없는 단순하고 효과적인 해결책이다.

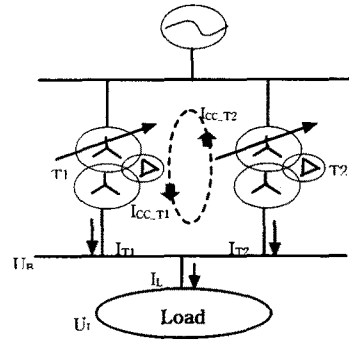


그림 2.2 변압기간 병렬운전 예

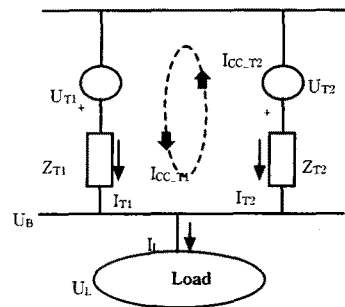


그림 2.3 두 변압기 병렬그룹과 전기적 모델

각 변압기 Bay에서 변압기 2차측 전류의 유효분과 무효분은 Communication Bus(LON)에 의거 병렬그룹에 속해있는 변압기간에 측정되고 배분된다. 교환된 전류는 단위법으로 표현되고 공통 기준전력과 전압에 관련되어야만 한다. 이 목적을 위하여 Voltage Control Function에서는 병렬운전중인 모든 변압기에서 동일하고, 공통인 파라메타인 기준전력을  $S_{base}$  로 정의한다. 만일 각기 다른 정격의 변압기로 구성된 그룹이라면 기준전력과 변압기 정격용량은 달라진다. 변압기 2차측 전압  $U_{r2}$ 를 기준전압으로 정하면, 이로부터 기준전류의 계산은 다음과 같다.  $I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot U_{r2}}$  앞에 서술한 것과 같이, 각 개별

변압기의 전류의 무효분(i.e reactive current component)은 순환전류 계산을 위하여 필요하다. 그러나 전류의 유효분은 총동과 부하전류를 계산키 위하여 사용되고, 도한 전압강하보상장치(LDC : Line Drop Compensator)에의 사용된다. 총 부하전류(pu 값)은 모든 개별 변압기의 합으로서 정의된다.

$\bar{I}_L = \sum_{i=1}^k \bar{I}_i$  여기서, 첨자 i는 변압기 Bay번호이고 k는 그룹(kmax =4)에서 병렬변압기 번호이다. 다음 단계는 Bay i를 흐르는 순환전류  $I_{CC-i}$  값을 끌어내는 것이다. Bay i에서의 순환전류의 크기  $I_{CC-i}$ 는 다음식에 의거 계산할 수 있다.

$$I_{CC-i} = -Im(\bar{I}_i - K_{Li} \times \bar{I}_L)$$

여기서  $I_m$ 의 괄호안 허수부분을 나타내고,  $\bar{K}_{Li}$  는 병렬그룹의 변압기의 수와 단락 리액턴스에 의존하는 상수이다. Voltage Control Function은 이 상수를 자동적으로 계산한다. 1차측에 변압기 리액턴스는 각 변압기 정격 명관으로 부터 계산할 수 있다. 리액턴스는 Voltage Control Function에 의해서 단위법(pu)으로 치환할 수 있다. 위 공식에서의 “-” 부호는 순환전류를 발생시키는 변압기에 대한 순환전류가 positive 값을 가지기 위해서 붙여진 것이다. 이는 sin, cos 함수의 수학적 정의의 즉, 순환전류가 기준전압보다 위상이 뒤질 때 전류의 무효분은 negative하기 때문에 필요하다.

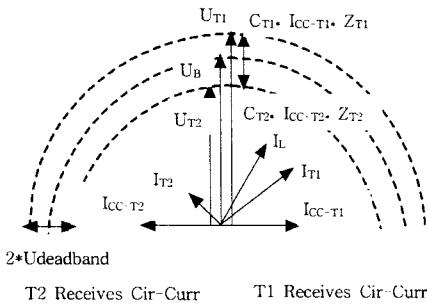


그림2.4 병렬운전 변압기 Vector Diagram

$$\bar{I}_{L-} = \bar{I}_{T1} + \bar{I}_{T2}, I_{CC-T1} = \text{img}[ \bar{I}_{T1} - (\frac{Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}}) \times \bar{I}_L ]$$

$$I_{CC-T2} = \text{img}[ \bar{I}_{T2} - (\frac{Z_{T1}}{Z_{T1} + Z_{T2}}) \times \bar{I}_L ]$$

이 방법으로 각 Voltage Control Function에서 각각의 Bay의 순환전류를 계산할 수 있다. 또한, 부호도 이용할 수 있다(i.e 변압기가 순환전류를 발생시키는 측은 “+”부호, 받아들이는 측은 “-”부호 의미). 각 변압기의 무부하 전압값의 비교가 필요하다. 각 Bay에서 순환전류의 크기는 우선적으로 다음식과 같이 전압편차  $U_{di}$ 로 변형된다.

$U_{di} = C_i \cdot I_{CC-i} \cdot X_i$  여기서,  $X_i$  는 변압기 i에 대한 단락 리액턴스이고  $C_i$ 는 Voltage Control Function에서 순환전류의 영향을 증감하는 보상 Factor이다.  $U_{di}$ 는 순환전류를 발생시키는 측의 변압기는 “+”값을 가지고, 순환전류를 받아들이는 측의 변압기는 “-”값을 가진다. 각 변압기에서 무부하전압의 크기는 대략  $U_i = U_B + U_{di}$  값을 가진다.

순환전류를 발생, 소비하는 변압기에서 계산된 무부하전압은 측정전압  $U_B$  보다 크거나 낮을 것이다. 이 계산된 무부하 전압은 따라서 정정전압  $U_{set}$  와 비교된다. deadband 바깥부분의 전압편차가 tap changer에 전압상승/하강 명령을 낸다. tap changer의 위치가 변압기 무부하전압과 직접적으로 비례하기 때문에 항상 이런 방식으로 전반적인 전압제어를 하여 교정한다.

### 3. EMTDC 이용 Simulation 결과

Simulation 결과, 부하(r)를 증가함에 따라 변압기간의 부하 전류의 위상차는 거의 무시할 정도였으며, 부하(r)를 감소시킴에 따라 위상차(phase shift)가 발생하여 순환전류가 증가함을 알 수 있었다. 즉, 이는 중부하의 경우보다 경부하때가 순환전

류(무효전류)가 더 많이 발생되어 변압기 과열에 영향을 주게 됨을 모의결과를 통해 알 수 있었다.

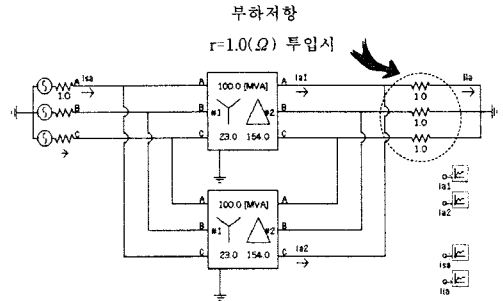


그림3.1 변압기 병렬운전 r=1.0인 경우 Simulation Diagram

Simulation결과 파형분석결과 부하를 증가 시켰을 경우 변압기간의 전류 위상차가 거의 없음을 알 수 있었다.

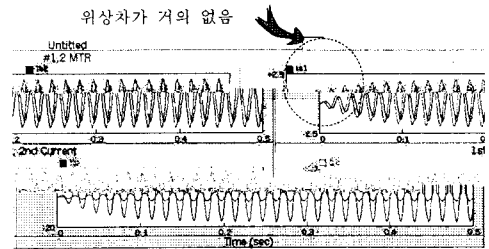


그림3.2 (그림3.1)의 Simulation 결과 파형

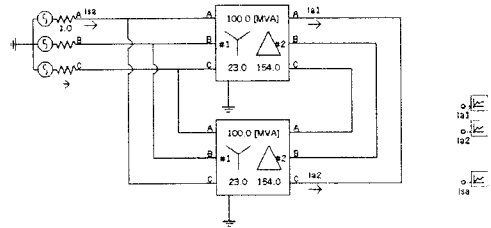


그림3.3 변압기 병렬운전 r=0인 경우 Simulation Diagram

부하(r)인 “0”인 경우는 #1,2 변압기 2차측 전류 위상차가 180°로 나타나 순환전류가 흐름을 알 수 있다. 즉, 위상차 만큼 국부적인 순환전류가 흐르고 변압기에 나쁜 영향을 주게된다.

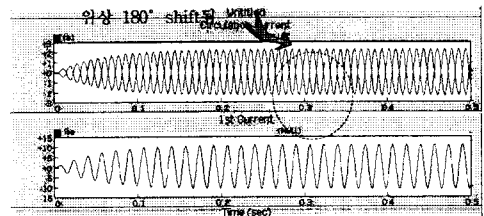


그림3.4 (그림3.3)의 Simulation 결과 파형

#### 4. 결 론

전력계통에서 변압기들은 전력설비 이용효율 증진과 전력공급 신뢰성을 높일 수 있도록 가능하면 병렬운전하는 것이 바람직하다. 하지만 전기적 특성이 다른 부하시 탭 전환장치(OLTC)가 있는 변압기들을 병렬운전할 경우 이들 부하시 탭 전환장치들 간에 목표 전압조정을 선접하기 위해 충돌(Fighting)하게 될 소지가 있다. 더욱이 자가발전기가 있는 전력계통에서는 발전기의 전압조정장치인 여자기까지 전압제어에 가세하게 되어 충돌의 가능성이 더욱 높아지게 된다. 따라서 부하시 탭 전환장치가 설치되어 있는 특히 다른 변압기들을 병렬운전 하고자 할 경우는 전압제어 특성을 분석하여 충돌을 피할 수 있도록 부하시 탭 전환장치의 제어변수(무효

순환전류 및 모션전압)들을 반드시 조정하여 불필요한 탭 전환을 억제하여 전체 조정Logic(Voltage Control Function의 Logic Circuit)의 안정성확보와 더불어 변압기 병렬운전시 신뢰성 증진을 위해 반드시 보강되어야 하는 2차측 모션보호방식 도입 또한 적극검토가 필요한 시점인 것 같다.

#### (참 고 문 헌)

- (1) ABB Main Transformer Parallel Operation Manual : ABB University & Training Center
- (2) 전력계통기술계산 기초 및 응용 : 도서출판 의제
- (3) Power system analysis : Mcgraw-Hill International Editions-JHON J. GRANGER , WILLIAM D. STEVENSON, NR