

비선형 부하 연결시 발생하는 전류 고조파에 의한 변압기 손실 해석

장승용, 한상훈, 최재호
충북대학교

Analysis of Transformer Losses Caused by Current Harmonics from Non-linear Load

Seungyong Jang, Sanghoon Han, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

본 논문은 변압기에 부하가 연결 되었을 때 발생하는 전류 고조파에 의한 변압기 손실을 분석한다. 3상 변압기에 대해서 선형 부하와 비선형 부하가 연결되었을 경우 변압기 손실 값을 계산한다. PSIM을 이용하여 부하를 모델링하고 시뮬레이션 수행한다. 시뮬레이션을 통하여 얻어진 데이터를 이용하여 변압기의 손실값을 계산한다.

1. 서 론

변압기는 전력 시스템 동작에서 중요한 장치 중 하나이다. 변압기는 소비자에게 지속적으로 전력을 공급해주어야 하기 때문에 기술적으로 요구되는 수명동안 정상적으로 유지되어야 한다. 그러나 전력변환장치에 의해 발생한 고조파는 역률을 저하시키고 온도의 과도한 상승을 유발하여 변압기의 수명을 단축시킨다. 따라서 변압기의 과열을 방지하면서 부하에 적합하도록 고조파에 의한 변압기의 손실들을 분석 할 필요가 있다. 본 논문에서는 변압기의 선형, 비선형 부하에 따른 손실을 분석하였다. 선형 부하는 순수 저항 부하를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 비선형 부하는 3상 싸이리스터 브릿지를 사용하였다. 측정된 고조파를 이용하여 3상 변압기의 이론적인 손실을 계산하였고, 시뮬레이션을 통하여 변압기의 전력 손실을 확인하였다.

2. 고조파에 의한 변압기 손실

변압기 손실은 부하에 독립적인 무부하(코어, 철) 손실과 부하의 영향을 받는 부하(구리, 동) 손실로 이루어져 있다.

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (1)$$

P_T : 총 변압기 손실(Total loss), P_{LL} : 부하 손실(Load loss), P_{NL} : 무부하 손실(No load loss)

2.1 무부하 손실

2차 권선을 개방한 상태 즉 부하를 걸지 않았을 때의 손실이고, 자속에 의하여 철심 중에 생기는 손실이다. 무부하 손실은 히스테리시스 손실(Hysteresis Loss)과 와전류 손실(Eddy current Loss)로 이루어져 있다.

$$P_{NL} = H + E = k_h \cdot f \cdot B_m^n + k_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (2)$$

H : 히스테리시스 손실, E : 와전류 손실, k_h : 히스테리시스 손

실 계수, B_m : 자속의 최대치, k_e : 와전류 손실 계수

2.2 부하 손실

부하 손실은 권선의 직류저항에 의한 저항 손실과 도체내의 와전류에 의한 와전류 손실 및 권선이외의 부분의 누설자속에 의한 표유 손실로 이루어져 있다. 와류 손실과 표유 손실을 합쳐서 광범위한 의미에서 표유 부하손 이라 부른다.

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{TSL} \quad (3)$$

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (4)$$

P_{DC} : 저항 손실, P_{TSL} : 표유 부하손, P_{EC} : 와전류 손실, P_{OSL} : 표유 손실

2.2.1 저항 손실

비정형 주기전류의 실효값은 직류성분 및 각 고조파의 실효값의 제곱의 합의 제곱근과 같다.

$$P_{DC} = R_{DC} \times I_{rms}^2 = R_{DC} \times \sum_{h=1}^{h_{max}} I_{h,rms}^2 \quad (5)$$

R_{DC} : 권선의 직류 저항, h : 고조파 차수,

$I_{h,rms}$: 고조파 전류의 실효값

2.2.2 와전류 손실

변압기 권선은 누설 자계 내에 있으므로, 도체 내에 유기전압이 발생하고, 유기전압은 전류밀도를 생성하여 결국 와전류 손실을 발생시킨다.^[1]

$$P_{EC} = P_{EC-O} \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 \cdot h^2 \quad (6)$$

P_{EC} : 권선 와전류 손실, P_{EC-O} : 측정 전류, 주파수에서의 와전류 손실, I_h : h차수 일 때의 rms 전류, I : rms 부하 전류

2.2.3 표유 손실

표유 손실(Other stray loss)은 권선 이외의 다른 변압기 구조적인 부분에 생기는 와전류 손실을 말한다. 이상적으로 자속은 모두 권선 도체 안으로 들어가야 하지만 실제로는 다른 부분들로 들어가는 자속도 존재한다. 하지만 이 자속의 자속밀도는 권선에 비해 작게 되므로 고조파의 지수가 작아지게 된다.^[1]

$$P_{OSL} = P_{OSL-O} \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^{0.8} \quad (7)$$

P_{OSL-O} : 측정 전류, 주파수에서의 표유 손실

2.2.4 고조파 손실 계수

고조파 손실 계수는 고조파 부하 전류로 인해 발생하는 열손실을 나타내는 비례 계수이다. (6)식과 (7)에서 P_{EC-O} 와 P_{OSL-O} 뒤의 식은 고조파 손실 계수 F_{HL} (Harmonic loss factor)를 나타낸다. 표류 손실의 경우 고조파 지수가 0.8이 된다.^[1]

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2} \quad (8)$$

F_{HL-EC} : 권선 와전류에 대한 고조파 손실 계수

3. 해석 결과

표 1 변압기 계수

Table 1 Transformer parameters

Power	18750[VA]
V_1	460[V]
V_2	120[V]
V_3	120[V]
I_{1R}	23.5333[A]
I_{2R}	45.1055[A]
I_{3R}	45.1055[A]
R_{dc1}	53.94751mΩ
R_{dc2}	5.43711mΩ
R_{dc3}	5.44328mΩ

표 1에는 해석에 사용한 변압기 계수를 나타내었다. 정격 전류는 변압기 용량과 정격 전압을 이용하여 계산하였고 저항은 실제 측정값을 적용하였다.

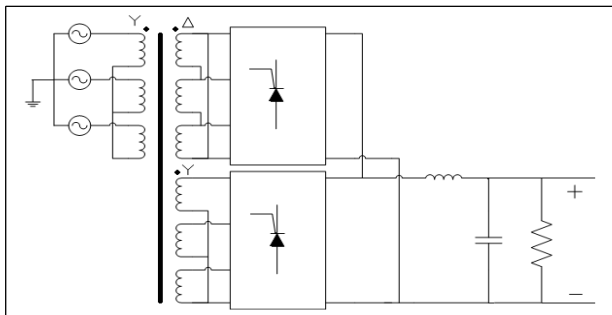


Fig. 1 Transformer wiring diagram and circuit scheme when transformer connected non linear load condition

그림 1에는 비선형 부하 연결시 변압기의 결선과 회로 구성을 나타내었다. 사용한 변압기는 3상 YDY 변압기이며 비선형 부하의 DC 부하로는 순저항 부하를 사용하였다.

표 2와 표 3에는 각각 선형과 비선형 부하 연결시 변압기 부하 손실을 계산한 값을 나타내고 무부하 손실을 더하여 총 손실 결과를 정리하였다. 마찬가지로 표 4에는 시뮬레이션 결과 얻어진 고조파 값을 토대로 손실을 계산한 값을 정리하였다.

표 2 선형 부하 연결 시 손실 계산 결과

Table 2 Transformer losses value under linear load

손실의 종류	선형 부하 연결	F_{HL}	선형 부하 연결 (실제손실값)
P_{dc}	136.8894		136.8894
P_{EC}	124.0238	1.0159	125.9927
P_{OSL}	61.0863	1.0008	61.1338
Total losses	451.9995		454.0159

표 3 비선형 부하 연결 시 손실 계산 결과

Table 3 Transformer losses value under non linear load

손실의 종류	비선형 부하 연결	F_{HL}	비선형 부하 연결 (실제손실값)
P_{dc}	151.2359		151.2359
P_{EC}	259.6082	7.8542	2039.0117
P_{OSL}	127.8668	1.6278	208.1358
Total losses	668.7108		2528.3833

표 4 시뮬레이션 손실 계산 결과

Table 4 Transformer losses value in simulation

손실의 종류	선형 부하 연결	비선형 부하 연결	F_{HL}	비선형 부하 연결 (실제손실값)
P_{dc}	129.7519	174.3410		174.3410
P_{EC}	127.1980	242.7314	8.3067	2016.3053
P_{OSL}	62.6498	119.5542	1.7109	204.5411
Total losses	449.5996	666.6266		2525.1873

4. 결론

본 논문에서는 부하에 따라서 발생하는 전류 고조파에 의한 변압기 손실을 분석하였다. 해석 결과 선형 부하가 연결되었을 때보다 비선형 부하가 연결되었을 경우 고조파가 더 많이 발생하고 손실도 더 큰 것을 알 수 있었다. 계산과 시뮬레이션의 경우 발생하는 고조파의 크기가 다르기 때문에 고조파 손실 계수는 약간의 차이를 보이지만 손실 값은 대체로 비슷한 경향을 보였다.

이 논문은 “국제 전기”의 “전류와 전압 고조파에 의한 배전용 변압기 손실 해석” 연구 과제 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] IEEE Std C57.110 2008, “Recommended Practice for Establishing Liquid Filled and Dry Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”, USA 2008.
- [2] Gordon R. Slemon, *Electric Machines and Drives*, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1992, pp. 23 29