

전류 고조파에 의한 변압기 손실 해석

장승용, 한상훈, 최재호
충북대학교

Transformer Losses Caused By Current Harmonics

Seungyong Jang, Sanghoon Han, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

최근 다양한 형태의 비선형 부하가 계통에 연계됨에 따라 이러한 부하에 적절한 전원을 공급하는 전력변환장치의 보급이 활발히 진행되고 있다. 이러한 전력변환장치들은 전력용반도체 소자의 스위칭에 의해 동작하기 때문에 전류의 고조파를 발생시키고, 이때 발생하는 고조파는 변압기의 손실을 증대시키고 역률을 저하시키며 온도의 과도한 상승을 유발하여 결국 변압기의 수명을 단축시킨다. 따라서 본 논문에서는 과열을 방지하면서 비선형 부하에 적절하게 연계하기 위하여 전류 고조파에 의한 변압기에서의 손실을 해석한다.

1. 서 론

변압기는 보통 정격 주파수와 선형 부하에서 사용되도록 설계된다. 하지만 오늘날에는 전력변환 장치와 같은 비선형 부하의 사용이 증가하고 있다. 변압기에 연결된 비선형 부하는 고조파를 야기하고 이에 따라 변압기에 영향을 미치게 된다. 고조파는 변압기의 손실을 증가시키고 과열을 유발하여 변압기의 절연을 파괴하고 이로 인해 변압기의 수명을 단축시키게 되었다. 따라서 이러한 고조파의 영향들을 피하기 위하여 우선 고조파에 의한 변압기의 손실들을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 비선형 부하를 연결함으로써 나올 수 있는 전류 고조파를 가정하여 변압기의 부하 손실을 분석하였다.

2. 고조파에 의한 변압기 손실

상용 변압기는 이상적인 변압기가 아니기 때문에 손실이 존재한다. 변압기의 입력측에 정현파 전압과 전류를 공급해 주어도 변압기 출력측에 연결된 전력변환장치에 의하여 고조파 전압과 전류가 변압기로 유입된다. 따라서 고조파의 유입으로 인한 변압기의 손실을 정의할 필요가 있다. 변압기 손실은 부하에 독립적인 무부하(코어 또는 철) 손실과 부하의 영향을 받는 부하(구리,동) 손실로 이루어져 있다.

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

P_T : 총 변압기 손실(Total loss), P_L : 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 철손이다. 무부하 손실은 히스테리시스 손실(Hysteresis Loss)과 와전류 손실(Eddy current Loss)로 이루어져 있다.^[1]

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

H : 히스테리시스 손실, E : 와전류 손실, k_h : 히스테리시스 손실 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 부하손이라 부른다.

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

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

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

2.2.1 저항 손실

비정현 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 와전류손을 발생시킨다. 이 손실은 주파수의 제곱에 비례한다.^[2]

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

P_{EC} : 권선 와전류 손실, P_{EC-R} : 정격일 때의 권선 와전류 손실, I_h : h차수 일 때의 rms 전류, I_R : 정격 주파수, 정격 부하일 때의 기본파 rms 전류
실제 와전류 손실값을 구하기 위하여 고조파 손실 계수 F_{HL} (Harmonic loss factor)가 곱해져야 한다.

$$F_{HL-EC} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2} \quad (7)$$

F_{HL-EC} : 권선 와전류에 대한 고조파 손실 계수, I : rms 부하 전류

2.2.3 표유 손실

표유 손실은 권선 이외의 다른 변압기 구조적인 부분들에 생기는 와전류 손실을 말한다. 이상적으로 자속이 모두 권선 도체 안으로 들어가야 하지만 실제적으로 다른 구조적인 부분들로 들어가는 자속도 존재한다. 하지만 자속밀도는 권선에 비해 작게 되므로 고조파의 지수가 작아지게 된다.

표유 손실(Other stray loss)은 아래의 식으로 표현될 수 있다:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^{0.8} \quad (8)$$

P_{OSL-R} : 정격에서의 표유 손실

표유 손실 역시 F_{HL} 을 곱하여 실제 손실값을 구해야 한다.

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2} \quad (9)$$

F_{HL-STR} : 표유 손실에 대한 고조파 손실 계수

3. 해석 결과

계산에 사용한 변압기 변수는 표 1과 같다.

표 1 변압기 변수
Table 1 Transformer parameter

Power (VA)	V1 (V)	V2 (V)	I_{1R} (A)	I_{2R} (A)	R_{dc1} (Ω)	R_{dc2} (Ω)
2000	380	137	3.03	4.86	1.45	0.5

이론적인 손실 계산을 위하여 2차측 전류를 표 2에 주어진 것과 같은 고조파 차수를 가진 구형파라고 가정하자. 주어진 변압기 변수에서 $I_1 = 4.86 A$ 이고 고조파 차수와 I_h 가 주어졌으므로 부하손실을 계산하는데 필요한 분모 분자 값을 구할 수 있다. 표 2에 고조파 전류와 함께 정리하였다.

표 2 2차측 고조파 전류의 크기
Table 2 Harmonic magnitude of secondary current

h	I_h	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$
1	4.86	1	1	1
5	1.05	0.0467	1.1669	0.1692
7	0.47	0.0094	0.4583	0.0444
11	0.35	0.0052	0.6276	0.0353
13	0.223	0.0022	0.3785	0.0174
17	0.16	0.0011	0.3132	0.0105
19	0.12	0.0006	0.2201	0.0064

표 3 해석적인 손실 계산 값
Table 2 Analytical calculated losses value

손실의 종류	선형 부하 연결	비선형 부하 연결	F_{HL}	비선형 부하 연결 (실제손실값)
P_{DC}	75.366	77.677		77.677
P_{EC}	4.109	17.112	3.91	66.908
P_{OSL}	2.025	2.598	1.204	3.128
P_L	81.5			147.713

표 3은 변압기에 선형부하를 연결하였을 때와 비선형 부하를 연결하였을 때의 손실과 고조파 손실계수와 비선형 부하가 연결되었을 때 실제 손실값을 나타내었다. 실제의 손실 값은 비선형 부하를 연결하였을 때의 손실에 고조파 손실 계수를 곱한 값으로 구할 수 있다. (3), (4)식에서 총 부하 손실은

$$P_L = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전류 고조파에 의한 변압기 손실들을 분석하고, 변압기에 비선형 부하를 연결하였을 때의 고조파를 가정하여 손실을 해석하였다. 해석 결과 비선형 부하가 연결되었을 때의 실제 손실 값이 선형 부하가 연결되었을 때 보다 더 큼을 확인할 수 있었다. 또한 비선형 부하가 연결되었을 경우 와전류 손실이 확연히 늘어남을 확인할 수 있었다.

이 논문은 "국제전기"의 "전류와 전압 고조파에 의한 배전용 변압기 손실 해석" 연구과제 지원에 의하여 연구되었습

참고 문헌

- [1] Gordon R. Slemon, *Electric Machines and Drives*, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1992, pp. 23 29
- [2] 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.