

전류 고조파에 기인하는 변압기 손실 해석

장승용¹, 한상훈¹, 최재호[†]

Power Loss Analysis of Transformer Caused By Current Harmonics

Seungyong Jang¹, Sanghoon Han¹, and Jaeho Choi[†]

Abstract

This study investigates transformer losses caused by current harmonics. Electrical transformers are designed to work under sinusoidal voltage and current waves at a rated frequency. Recently, various nonlinear loads, such as power electronic converters, are connected to a power system; these converters generate current harmonics. Current harmonics increase power loss in transformers, which results in several problems, including temperature increase of the transformer and insulation damage. These problems will eventually shorten the operational life of the transformer. In this study, different types of losses caused by current harmonics in three-phase transformers are studied under linear and nonlinear load conditions. Linear loads are simulated and experimented on using pure resistance load, whereas nonlinear loads are simulated and experimented on using a three-phase twelve-pulse thyristor full-bridge rectifier. The different types of losses in three-phase transformers are evaluated analytically through the experimental result and simulation in PSiM.

Key words: Current harmonics, Non-linear load, Transformer losses

1. 서 론

변압기는 보통 정격 주파수와 선형 부하에서 사용되도록 설계된다. 하지만 오늘날에는 다양한 형태의 비선형 부하가 계통에 연계됨에 따라 이러한 부하에 적절한 전원을 공급하는 전력변환장치의 보급이 활발히 진행되고 있다. 비선형 부하와 전력변환 장치는 변압기의 높은 손실을 유발하고 수명을 단축시킨다 [1].

변압기는 전력 시스템 동작에서 중요한 장치 중 하나이다. 변압기는 소비자에게 지속적으로 전력을 공급해주기 때문에 기술적으로 요구되는 수명동안 정상적으로 유지되어야 한다. 변압기의 수명은 절연 상태에 달려있다. 변압기의 절연 저하는 변압기의 과도한 온도 상승이나 절연을 위한 고체와 액체의 산화, 잘못된 냉각 시스템 등 많은 요소들에 의해 일어날 수 있다. 이런 현상들

은 변압기의 절연 강도를 줄어뜨리게 하고 전력 품질을 떨어뜨린다.

전력용 변압기의 동작에 영향을 미치는 다른 요인으로 고조파가 있다. 고조파는 아크로 (Arc furnace), 모터부하, 전력용 반도체 소자, 전자기기 등등의 다양한 비선형 부하에 의하여 발생한다. 전력변환장치의 경우 전력용 반도체 소자의 스위칭에 의해 동작하기 때문에 전류의 고조파를 발생시킨다. 발생한 고조파는 역률을 저하시키고 온도의 과도한 상승을 유발하여 변압기의 수명을 단축시킨다 [2].

따라서 변압기의 과열을 방지하면서 비선형 부하에 적합하도록 전류 고조파에 의한 변압기의 손실들을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 변압기에 선형, 비선형 부하가 연결되었을 경우에 발생하는 전류 고조파에 의한 변압기 손실을 분석하였다. 선형 부하로서는 순수 저항부하를 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 비선형 부하로서는 3상 12-펄스 싸이리스터 브릿지를 사용하였다. 측정된 고조파를 이용하여 3상 변압기의 이론적인 손실을 계산하고 실제 측정결과와 비교하였다. 그리고 시험에 사용된 변압기 파라미터를 이용하여 PSiM 시뮬레이션을 이용하여 고조파 전류에 의한 변압기의 전력손실이 실험에 의한 결과와 유사함을 확인함으로써 향후 산업 현장에서 PSiM

Paper number: TKPE-2016-21-1-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: choi@cbnu.ac.kr, School of Electrical Eng., Chungbuk National University

Tel: +82-43-261-2425 Fax: +82-43-276-7217

¹ School of Electrical Eng., Chungbuk National University
Manuscript received Oct. 23, 2015; revised Nov. 17, 2015;
accepted Dec. 19, 2015

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

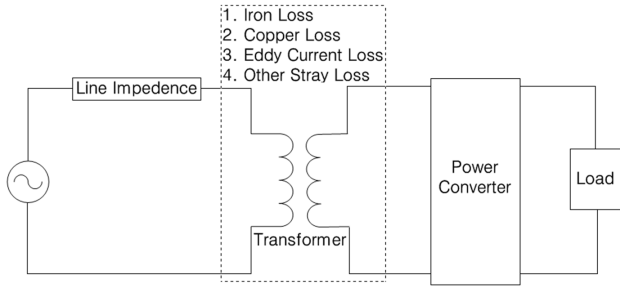


Fig. 1. Transformer losses caused by current harmonics and distorted voltage.

시뮬레이션의 해석결과를 변압기 설계에 쉽게 적용하는 가능성을 입증하였다.

2. 고조파에 의한 변압기 손실

그림 1은 고조파 전류 및 전압에 기인하는 변압기 손실을 나타낸다. 변압기 손실은 일반적으로 부하에 독립적인 무부하 (코어 또는 철) 손실과 부하의 영향을 받는 부하 (동) 손실로 이루어져 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다 [3, 7].

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

P_T : 총 변압기 손실 (Total loss)

P_L : 부하 손실 (Load loss)

P_{NL} : 무부하 손실 (No load loss)

2.1 무부하 손실

변압기의 무부하 손실은 2차 권선을 개방한 상태 즉 부하를 연결하지 않았을 때의 손실이고 자속에 의하여 철심 중에 생기는 철손이다. 무부하 손실은 (2)와 같이 히스테리시스 손실 (Hysteresis loss)과 와전류 손실 (Eddy current loss)로 이루어져 있다 [4].

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

H : 히스테리시스 손실, E : 와전류 손실

k_h : 히스테리시스 손실 계수, f : 주파수,

B_m : 자속의 최대치, k_e : 와전류 손실 계수

n : 히스테리시스 상수 ($1.5 < n < 2.5$)

무부하 손실은 변압기의 개방시험을 통하여 측정할 수 있다. 변압기 개방시험은 변압기 1차측 (고압측) 입력단에 정격 전압을 인가하고 2차측 (저압측)을 개방하여 1차측의 전력을 측정하는 것이다. 이때 측정된 전력이 무부하 손실이다 [5].

표 1에는 본 논문에 사용한 변압기의 개방시험 결과

TABLE I
TRANSFORMER OPEN CIRCUIT TEST RESULT

Active power	0.13[kW]
Reactive power	0.83[kvar]
Apparent power	0.86[kVA]
Power factor	0.153
Phase angle	81.2 °
Frequency	60.02[Hz]

를 정리하였다. 개방시험 결과 이 변압기의 무부하 손실은 130[W]로 측정되었다.

2.2 부하 손실

변압기의 부하 손실은 권선의 직류저항에 의한 저항 손실과 권선과 코어 클램프 (Core clamp)와 자기 절연 (Magnetic shield)과 변압기 외함 (Enclosure, tank wall) 등에서 전자기장 (Electromagnetic field)에 의해 발생하는 표유 부하손실로 이루어져 있다. 변압기에서는 도체 내의 와전류에 의한 와전류 손실과 변압기 권선 이외의 부분의 누설자속에 의한 표유 손실이 존재하는데 와전류 손실과 표유 손실을 합쳐서 광범위한 의미에서 표유 부하손이라 부른다 [3].

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

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

P_{DC} : 저항 손실, P_{TSL} : 표유 부하손

P_{EC} : 와전류 손실, P_{OSL} : 표유 손실

2.2.1 저항 손실

변압기 권선의 저항 손실은 권선의 저항을 측정하고 이를 전류의 제곱에 곱함으로써 구할 수 있다. 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 시간에 따라 변하는 자계 내에 있으므로 도체 내에 유기전압이 발생하고 유기전압은 전류밀도를 생성하여 결국 와전류 손실을 발생시킨다. 변압기에서 바깥쪽 권선보다 코어에 상대적으로 더 가까운 안쪽 권선이 더 큰 와전류 손실을 가지게 된다. 왜냐하면 코어에 가까울수록 자속밀도가 더 커지기 때문이다. 와

전류 손실은 (2)에 나타낸 바와 같이 주파수의 제곱에 비례한다 [4,6].

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

P_{EC} : 권선 와전류 손실

P_{EC-R} : 정격 전류와 정격 주파수에서의 와전류 손실

h : 고조파 차수

h_{max} : 충분히 높은 고조파 차수

I_h : h 차수 일 때의 rms 전류

I_R : 정격 주파수, 정격 부하일 때의 기본파 실효치 전류

(6)은 변압기의 정격 전류 조건에서 와전류 손실이 측정되었을 때에만 한정된 식이다. 실제 와전류가 측정될 때는 정확하게 정격 조건에서 측정되지 않기 때문에 측정조건을 반영하기 위하여 식을 더 일반적으로 바꾸어 주어야 한다.

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

P_{EC-O} : 측정 전류와 측정 주파수에서의 와전류 손실

I : 측정된 실효치 부하 전류

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=hmax} I_h^2} \quad (8)$$

그리고 비선형 부하 전류의 실효치는 (8)과 같으므로 이를 (7)에 대입하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{EC} = P_{EC-O} \times \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} I_h^2} \quad (9)$$

권선 와전류에 대한 고조파 손실 계수 (Harmonic loss factor)는 고조파 부하 전류로 인한 실효치 전류의 증가로 인한 과열 효과를 나타내는 비례 계수이다. (9)로부터 고조파 손실계수 (F_{HL})은 (10)과 같이 정의한다.

$$F_{HL-EC} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2} \quad (10)$$

F_{HL-EC} : 권선 와전류에 대한 고조파 손실 계수

2.2.3 표류 손실

표류 손실은 권선 이외의 다른 변압기 구조적인 부분들에 생기는 손실을 말한다. 코어, 클램프 그리고 다른 부분에서의 표류 손실은 와전류 손실과 마찬가지로 부하 전류의 제곱에 비례한다. 하지만 이 표류 손실은 주파수의 제곱에 비례하여 증가하지는 않는다. 변압기 제조자들과 다른 연구자들의 연구에 의하면 변압기 버스바 (Bus bars)와 연결부 (Connection)와 그리고 다른 구조적인 부분들의 손실은 고조파 지수가 0.8 또는 그 이하로 된다. 그 이유는 이상적으로 자속이 모두 권선 도체 안으로 들어가야 하지만 실제적으로 다른 구조적인 부분들로 누설자속이 존재하기 때문이다. 따라서 자속 밀도는 권선에 비해 작게 되므로 고조파의 지수가 작아지게 된다. 와전류 손실과 마찬가지로 표류 손실 (Other stray loss)도 측정조건을 반영하여 (11)과 같이 표현할 수 있다 [5,6].

$$P_{OSL} = P_{OSL-O} \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^{0.8} \quad (11)$$

P_{OSL} : 표류 손실

P_{OSL-O} : 측정 전류, 측정 주파수에서의 표류 손실

와전류 손실과 마찬가지로 표류 손실에 대한 고조파 손실계수 (F_{HL-OSL})를 (12)와 같이 정의한다.

$$F_{HL-OSL} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2} \quad (12)$$

F_{HL-OSL} : 표류 손실에 대한 고조파 손실 계수

변압기의 부하 손실은 자계 해석을 통하여 보다 정확하게 구할 수 있지만 과정이 복잡하여 본 연구의 취지에 부합하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 간편한 방법으로서 IEEE 표준에서 제시한 바를 참조하여 (3)으로부터 부하 손실과 저항 손실의 차로써 표류 부하손을 먼저 구하고 건식 변압기의 경우 와전류 손실은 표류 부하손의 67%로 산정하고 표류 손실은 표류 부하손과 와전류 손실의 차로써 구하도록 하였다 [5,6].

$$P_{EC} = 0.67 \times P_{TSL} \quad (13)$$

$$P_{OSL} = P_{TSL} - P_{EC} = 0.33 \times P_{TSL} \quad (14)$$

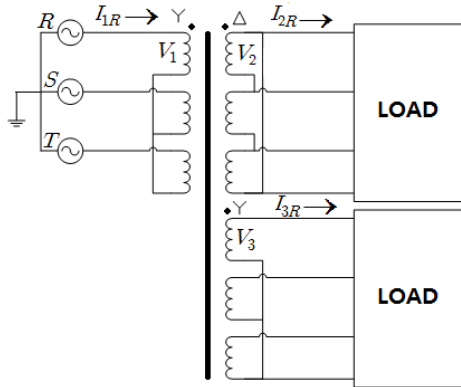


Fig. 2. Transformer wiring diagram.



Fig. 3. Pure resistance for practical experiment.

TABLE II
TRANSFORMER PARAMETERS FOR EVALUATION OF LOSSES

Rated Power 18.75[kW]			
Parameters	Value	Parameters	Value
V_1	460[V]	I_{1R}	23.5333[A]
V_2	120[V]	I_{2R}	45.1055[A]
V_3	120[V]	I_{3R}	45.1055[A]
R_p	53.9475[mΩ]	L_t	1.2627[mH]
R_s	79.9859[mΩ]	L_m	834.9[mH]
R_t	26.6312[mΩ]	N_p	460
L_p	1.1383[mH]	N_s	120
L_s	1.1383[mH]	N_t	208

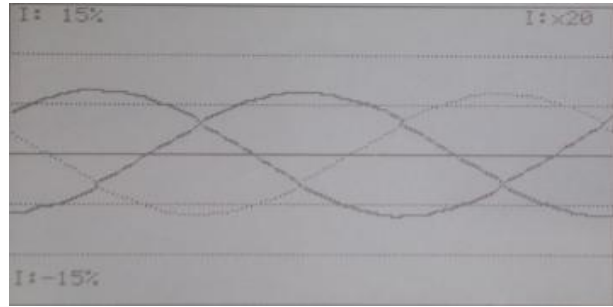
3. 해석 결과

그림 2에 본 변압기 손실 해석에 사용한 변압기의 결선도를 나타내었다. 사용한 변압기는 3상 YDY 변압기로서 원자력발전소용 UPS 구동을 위한 12-펄스 사이리스터 컨버터의 입력측에 사용되는데 컨버터의 입력 단에 전류 위상 차이를 발생시켜 12 펄스 컨버터로 동작하도록 설치되었다.

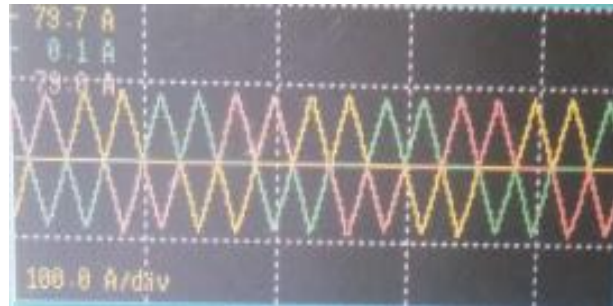
표 2에는 측정에 사용한 변압기의 파라미터를 나타내었다. 정격 전류는 변압기 용량과 정격 전압을 이용하여 계산하였고 저항과 인덕턴스 값은 실제 측정값을 적용하였다.

3.1 실험 결과

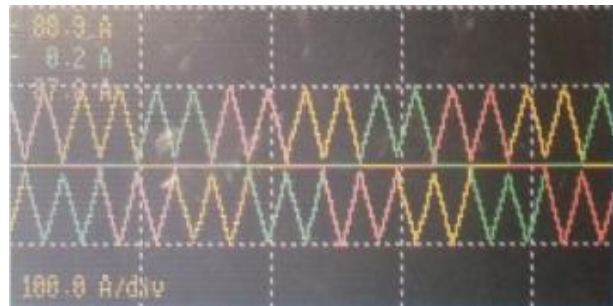
실험은 선형 부하와 비선형 부하를 각각 연결하여 진행하였으며 선형 부하로는 그림 3의 열저항기를 사용하였다. 저항의 크기는 2차 Δ측에는 1.7Ω, 2차 Y측에는 1.3Ω을 연결하였다. 비선형 부하로는 그림 5에 보인 바와 같이 사이리스터 브릿지 회로를 각각의 변압기 2차측에 연결하고 브릿지의 직류출력측을 병렬로 연결하고



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Experimental results when transformer is under non-linear load condition: (a) Input Y current, (b) output Δ current, (c) output Y current.

1.25Ω 순저항 부하를 부착하였다.

그림 4에는 변압기에 비선형 부하를 연결하였을 때 나타난 변압기 입력과 출력 전류 파형을 나타내었다. 전류 고조파 값과 파형을 얻기 위해 계측기를 사용하였는데 입력측은 YOKOGAWA CW 240, 출력측은 HIOKI 3197

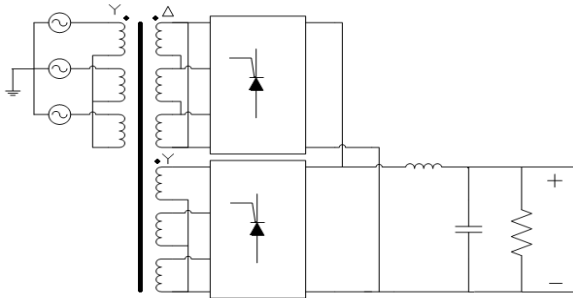


Fig. 5. Transformer wiring diagram and circuit scheme when transformer connected nonlinear.

TABLE III
HARMONIC MAGNITUDE OF CURRENT UNDER LINEAR LOAD

h	Current Harmonics(A)	
	2차 Δ	2차 Y
1	36.45	46.64
5	0.53	0.09
7	0.38	0.41
11	0.14	0.27
13	0.11	0.25
17	0.11	0.08
19	0.02	0.12

TABLE IV
HARMONIC MAGNITUDE OF CURRENT UNDER NON-LINEAR LOAD

h	Current Harmonics(A)	
	2차 Δ	2차 Y
1	36.64	45.19
5	17.76	21.74
7	8.13	9.37
11	0.32	0.91
13	0.32	0.54
17	1.01	2.3
19	0.56	1.36

Power Quality Analyzer를 사용하였다.

표 3과 표 4에는 이론적인 손실 계산을 검증하기 위하여 실제 실험에서 측정된 전류 고조파를 정리하였다. 실제 측정에서는 50차 고조파 고조파까지 측정하였지만 19차 이상의 고조파 전류의 크기가 미미하므로 표에는 19차 고조파까지만 나타내었다.

3.2 실험 결과에 의한 손실계산

표 5와 표 6에는 선형과 비선형 부하 조건에서의 변압기 손실값을 계산하여 정리하였다.

표 3와 표 4에 나타낸 실험에서 측정된 고조파 전류 값들을 이용하여 2장에서 전개한 변압기에서의 이론적인 손실 값들을 계산하는 수식에 대입하여 변압기 손실

TABLE V
TRANSFORMER LOSSES VALUE UNDER LINEAR LOAD IN EXPERIMENT

Type of losses	Loss under linear load(W)	F_{HL}	Corrected losses under linear load(W)
P_{NL}	130		130
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

TABLE VI
TRANSFORMER LOSSES VALUE UNDER NON-LINEAR LOAD IN EXPERIMENT

Type of losses	Loss under non linear load(W)	F_{HL}	Corrected losses under non linear load(W)
P_{NL}	130		130
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

값들을 계산한 결과를 표시하였다.

또한 이론적인 계산값 들의 당위성을 검증하기 위하여 실험에서 계측기에서 실측한 변압기 손실값 들의 비교결과를 표 7에 정리하였다. 표 7에 나타낸 바와 같이 선형 부하를 연결하였을 경우에 계산 결과로부터 얻어진 손실은 454[W]로 2.8735%이고 손실측정치는 390[W]로 2.4684%이어서 약간의 오차가 발생하기는 하였지만 비슷한 결과를 나타내었다. 또한 비선형부하를 연결하였을 경우에는 계산에 의하여 얻어진 손실은 2528[W]로 16.2076%이고 측정에 의한 손실은 2510[W]로 16.0897%이어서 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 앞에 언급한 변압기 각각의 손실값들을 유도한 수식의 타당성을 인정하여 향후 변압기 설계에 반영할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 시뮬레이션

앞에 기술한 바와 같이 실험 측정에 의하여 변압기의 손실을 분석할 수 있겠으나 현장에서 범용 전력전자회로 해석용 범용 시뮬레이터를 이용하여 변압기 해석이 가능한 지 검토하기 위하여 표 2에 나타낸 실험에서 사용한 변압기 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

TABLE VII
COMPARATIVE TRANSFORMER LOSSES FROM
CALCULATION AND MEASUREMENT IN EXPERIMENT

Type of losses	Linear load (W)	Nonlinear load (W)
Total power losses by calculation	454	2528
Total power losses by measurement	390	2510

TABLE VIII
HARMONIC MAGNITUDE OF TERTIARY CURRENT IN
SIMULATION UNDER NON LINEAR LOAD CONDITION

h	I_h
1	40.0500
5	20.6348
7	10.1049
11	1.0498
13	0.9641
17	0.4394
19	0.6052

시뮬레이션은 PSIM을 통하여 수행하였는데 3.1에서와 같이 실험에서와 같은 선형 부하 조건과 비선형 부하 조건에서 분석하였는데 비선형 부하 조건은 그림 5에 보인 바와 같다.

그림 6에는 시뮬레이션에서 YDY 변압기의 출력측에 싸이리스트 브릿지회로를 연결하였을 때 변압기의 1차측과 2차측 각각의 전류파형을 나타내었다.

표 8에는 시뮬레이션을 통하여 측정된 전류 고조파의 값을 나타내었다. 비선형 부하가 연결되었을 경우 표와 같은 고조파가 측정되었으나 선형 부하가 연결되었을 경우는 시뮬레이션의 특성상 전류 고조파가 발생하지 않았다. 따라서, 비선형 부하 조건에서의 고조파 분석결과만을 나타내었는데 실험을 통하여 나온 값과 비교하기 위하여 시뮬레이션 역시 전류 고조파를 19차까지만 고려하였다.

표 9와 표 10에 시뮬레이션을 통한 손실 계산 결과를 정리하였다. 실험에서의 분석결과와 마찬가지로 계산에 의한 손실과 측정에 의한 손실을 비교한 결과를 표 11에 정리하여 나타내었다.

시뮬레이션의 결과를 이용하여 계산에 의하여 도출한 변압기의 총 손실은 선형 부하에서 450[W]이고 비선형 부하에서 2525[W]로 실험 결과를 이용하여 계산에 의하여 구했던 변압기의 총 손실이 선형 부하와 비선형 부하에서 454[W], 2528[W] 이었음을 감안할 때 매우 근접한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

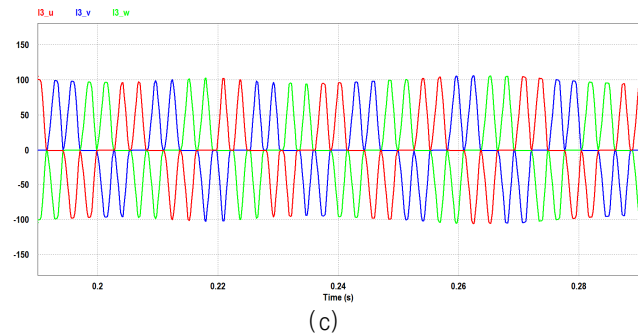
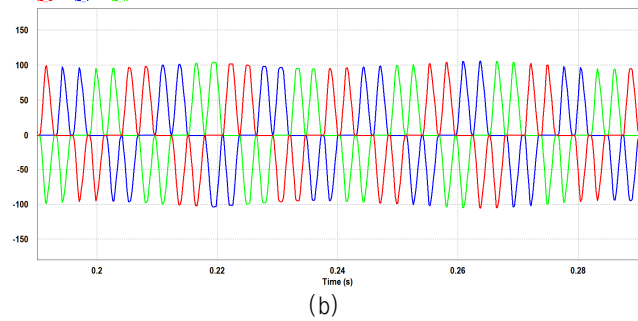
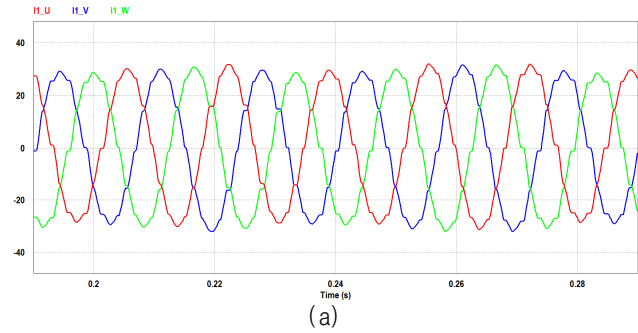


Fig. 6. Simulation results when transformer is under non-linear load condition: (a) Input Y current, (b) output Δ current, (c) output Y current.

표 11에 나타낸 바와 같이 선형 부하를 연결하였을 경우에 계산 결과로부터 얻어진 손실은 450[W]로 2.9389%이고 손실측정치는 443[W]로 2.9418%이어서 매우 유사하였다. 또한 비선형부하를 연결하였을 경우에는 계산에 의하여 얻어진 손실은 2525[W]로 15.6997%이고 측정에 의한 손실은 2481[W]로 16.2422%이어서 마찬가지로 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

이상에서 실험 결과를 이용하는 경우와 시뮬레이션을 이용하는 경우 둘다 계산에 의한 손실값이나 측정에 의한 손실값이 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 그러므로 간략한 고조파 전류에 의한 변압기의 손실계산은 PSiM 시뮬레이션을 이용하여 분석하고 이를 설계에 반영할 수 있음이 입증되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 전류 고조파에 의한 변압기 손실들을

TABLE IX
TRANSFORMER LOSSES VALUE UNDER LINEAR
LOAD IN SIMULATION

Type of losses	Loss under linear load(W)	F_{HL}	Corrected losses under linear load(W)
P_{NL}	130		130
P_{dc}	129.7519		129.7519
P_{EC}	127.1980	1	127.1980
P_{OSL}	62.6498	1	62.6498
Total losses	449.5996		449.5996

TABLE X
TRANSFORMER LOSSES VALUE UNDER NON LINEAR
LOAD IN SIMULATION

Type of losses	Loss under non linear load(W)	F_{HL}	Corrected losses under non linear load(W)
P_{NL}	130		130
P_{dc}	174.3410		174.3410
P_{EC}	242.7314	8.3067	2016.3053
P_{OSL}	119.5542	1.7109	204.5411
Total losses	666.6266		2525.1873

TABLE XI
COMPARATIVE TRANSFORMER LOSSES FROM
CALCULATION AND MEASUREMENT IN SIMULATION

Type of losses	Linear load (W)	Nonlinear load (W)
Total power losses by calculation	450	2525
Total power losses by measurement	443	2481

분석하였다. 실제 실험을 통하여 얻어진 전류 고조파를 이용하여 이론적으로 수식을 활용하여 손실 값을 계산하고 실험 측정값에 의하여 구한 손실과 비교하였다. 또한 같은 조건에서 범용 전력전자회로 해석용 시뮬레이터인 PSiM을 이용하여 실험 결과에서의 분석결과와 비교하였다. 본 논문 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 선형 부하가 연결 되었을 경우와 비선형 부하가 연결 되었을 경우의 변압기 손실을 비교한 결과 비선형 부하가 연결되었을 때의 손실 값이 선형 부하가 연결 되었을 때보다 손실이 더 많았는데, 이로써 고조파에 의하여

손실이 증대하는 것을 확인할 수 있었다.

2) 계산에 의한 변압기 손실값과 측정에 의한 손실값이 서로 비슷함이 확인 되었는데 이로써 이론식에 의한 각각의 손실값을 고려하여 변압기 설계에 반영할 수 있음이 입증되었다.

3) 실험과 시뮬레이션을 통해 얻은 손실 값을 비교할 때 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있었는데 변압기의 손실분석을 위한 간편한 방법으로서 PSiM 시뮬레이션을 사용할 수 있음이 입증되었다.

본 논문에서는 변압기의 와전류 손실을 구하기 위하여 부하 손실에서 저항 손실을 감한 값을 표류 부하손실로 가정하고 이에 일정비를 적용하는 방식을 사용하였는데 변압기의 종류에 따라서 달라질 수 있다. 따라서 앞으로의 연구에서는 자계 해석을 포함하여 고려되지 않은 파라미터를 반영한 보다 정확한 등가회로를 구축하여 정확한 손실을 계산하고 이를 시뮬레이션 틀에 반영하는 방안이 요구된다.

이 논문은 “국제전기(주)”의 “전류와 전압 고조파에 의한 배전용 변압기 손실 해석” 연구과제 지원에 의해 수행한 연구입니다.

본 연구 수행에 있어서 기술적인 도움을 주신 국제전기(주) 김한기 연구원에게 감사드립니다.

References

- [1] D. M. Said and K. M. Nor, “Simulation of the impact of harmonics on distribution transformers,” *IEEE International Conf. on Power and Energy (PECon'08)*, pp. 335-340, 2008.
- [2] Sumaryadi, H. Gumilang, and A. Susilo, “Effect of power system harmonic effects on degradation process of transformer insulation system,” *IEEE International Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM'2009)*, pp. 261-264, 2009.
- [3] A. A. Elmoudi, *Evaluation of power system harmonic effects on transformers: Hot spot calculation and loss of life estimation*, Ph. D. Thesis, Helsinki University of Technology, pp. 8-9, 2006.
- [4] G. R. Slemon, *Electric Machines and Drives*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1992.
- [5] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering*, Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [6] *IEEE Std. C57.110-2008*, “Recommended practice for establishing liquid-filled and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents,” 2008.
- [7] A. Gupta and R. Singh, “Computation of transformer losses under the effects on nonsinusoidal currents,” *Int. Journal Advanced Computing*, vol. 2, no. 6, pp. 91-104, 2011.



장승용(張丞鎔)

1989년 9월 3일생. 2014년 충북대 전자정보 대학 전기공학과 졸업. 2015년 현재 동 대학원 석사과정.



한상훈(韓相訓)

1990년 11월 30일생. 2015년 충북대 전자정보 대학 전기공학과 졸업. 2015년 현재 동 대학원 석사과정.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기공학부 교수. 1993년, 1998년, 2003년, 2009년 University of Toronto 객원교수. 2002년 Aalborg University Danfoss 객원교수. 2005년~2008년 당 학회 부회장. 2009년~2011년 Journal of Power Electronics (JPE) Editor-in-Chief, 2012년 당 학회 회장, 현 당 학회 명예회장.