

# 변압기의 고조파 장애 영향에 대한 고찰

김 세 동 <두원공과대학 전기과 교수/기술사>

## 1. 개 요

가정이나 공장에 공급되는 전원은 교류이다. 교류는 직류보다 큰 전력을 먼 거리에 훨씬 경제적으로 전송할 수 있다. 그리고 교류를 사용하면 변압기를 이용하여 전압을 쉽게 변화시킬 수 있으므로 전력의 전송 효율이 높아지게 된다. 따라서, 교류전송방식에서 전력용 변압기가 널리 사용되고 있으며, 전기설비에서 전력용 변압기는 가장 중요한 기기이다.

변압기 제조기술은 크게 개발이 진행되어 왔으며, 최근 들어 환경보전, 에너지 절약형, 보수 용이와 화재에 대한 안전성 및 Oilless화된 변압기 개발이 필요하게 되었다.

이와 더불어 고분자 재료의 현저한 발달에 따라 전기적, 기계적으로 우수한 에폭시 수지(epoxy resin)가 개발되었고, 이를 변압기에 적용하여 몰드 변압기가 제조되었다. 현재는 몰딩 기술의 진보에 따라 66[kV]급 뿐만 아니라 22.9[kV]급까지 널리 적용되어 점차 고전압 대용량화와 소형·경량의 변압기가 생산되고 있다.

또한, 제철산업(주)에서 국내 최초로 개발 및 상용화한 아몰퍼스 변압기는 현재의 변압기 철심을 방향성 규소강판 변압기(G-9 또는 G-6) 대신 비정질 자

성재료(amorphous metal)로 대체하여 무부하손을 현재 사용중인 일반 변압기의 1/5 수준으로 줄인 에너지 절약형 신기술 변압기가 생산되고 있다.

표 1. 고조파가 전기기기에 미치는 영향의 분류

분 류	현 상	영향을 받는 기기
고조파에 의한 과전류 유입		콘덴서 리액터
고조파 전압의 중첩	이상음 과열 소손 오차 오동작제어	변압기 회전기 전력케이블 배선용차단기 누전차단기 전력량계 지시 계기
순시파형의 왜형	오차 제어불안정 오동작제어	인버터 지시 계기 보호계전기 조명기구 각종 위상제어기기
유도 장애	잡음 화상 일그러짐	전송장비 통신장비

반면에 근래에 들어 첨단기술의 발전과 아울러 고조파 발생원이라고 할 수 있는 각종 사이리스터 및

반도체 응용기기, 전력전자기술 응용기기의 사용 증가로 인하여 전기수용설비 측에서 고조파에 의한 각종 사고 및 장해 요인이 크게 증가하고 있는 실정이다.

이와같이 부하설비의 다양화 및 전력전자 기술 응용 범위의 확대로 고조파 문제가 증대되고 있으며, 표 1에서 보는 바와 같이 고조파가 미치는 영향으로 콘덴서, 직렬리액터, 변압기, 회전기 등에서의 이상음, 과열, 소손 등의 사고가 발생하고, 지시 계기, 보호계전기 등의 오차, 오동작 등이 발생하고 있는 것으로 지적된다. 본고에서는 변압기의 고조파 장해 영향에 대해서 알아보려고 한다.

## 2. 변압기의 원리

변압기는 1882년에 프랑스의 고라와 영국의 짐스라는 사람에 의해서 발명되었는데, 그 원리는 패러데이가 발견한 전자유도의 법칙을 응용한 것이다.

그림 1의 (a)는 변압기의 회로를 나타낸 것으로 간단히 (b)와 같이 기호로 나타낼 수 있다. 1차 권선(primary winding)과 2차 권선(secondary winding)은 전기적으로 분리되어 있으나 자기적으로는 결합되어 있다.

1차 권선에 교류 전류를 흘리면 철심을 통과하는 자속이 변화하게 되어 전자 유도 작용에 의한 유도 기전력이 2차 권선에 발생된다. 이때 유도 기전력은 자기 회로를 통과하는 자속의 변화 속도와 양쪽에

감겨 있는 권수에 따라 달라진다.

1차 측의 주파수를 일정하게 하면 2차 측도 같은 주파수가 된다. 2차 권선수가 1차 권선수 보다 적으면 2차 전압이 1차 전압보다 낮게 된다. 반대로 2차 권선수가 많으면 1차 전압보다 2차 전압이 커진다. 전자를 강압기(step-down transformer)라 부르고 후자를 승압기(step-up transformer)라 한다.

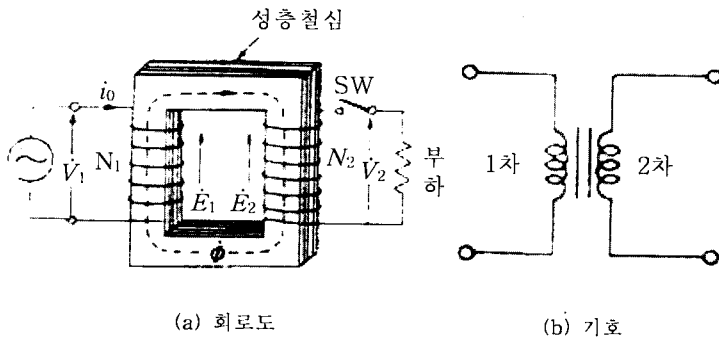
2차 권선에 흐르는 전류의 양은 연결된 부하에 따라 달라지며, 2차 전류에 의해 1차 전류가 달라진다. 변압기는 1차 권선에 공급된 전력을 최소의 손실로 2차 권선에 전달하는 전기 기기이다. 강압기인 경우 전압은 1차측이, 전류는 2차측이 크다 ( $P = V_1 I_1 = V_2 I_2$ ).

전압, 전류, 권수 사이의 관계를 나타낸 것이 식 (1)이고, 이 식을 권수비(turn ratio) 또는 변압비(transformer ratio)라 부른다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

여기서  $V_1$  : 1차 전압[V],  $V_2$  : 2차 전압[V],  $N_1$  : 1차 권선수[회],  $N_2$  : 2차 권선수[회],  $I_1$  : 1차 전류[A],  $I_2$  : 2차 전류[A]를 나타낸다.

코일 속을 텅빈 공간으로 두기보다는 무엇인가 철과 같은 것을 넣으면 자속이 증가하여 인덕턴스가 커지게 된다. 그래서 대부분의 코일은 자심을 중공(中空)으로 하지 않고 다음과 같은 것을 코일속에 넣어서 자속 밀도가 높아지도록 하고 있다.



(a) 회로도 (b) 기호  
그림 1. 변압기의 회로 구성

## 3. 고조파가 변압기에 미치는 영향

고조파가 변압기에 미치는 영향은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- ① 고조파 전류 중첩에 의한 동손, 철손 증가
- ② 철심의 자화 현상으로 인한 이상음 발생

③ 변압기 권선과 선로 정전용량 사이의 공진 현상

④ 절연 열화

### 3.1 손실의 증가

#### 1) 동손

동손은 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$P_c = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} R_n I_n^2 \text{ [W]} \quad (2)$$

여기서,  $I_n$  :  $n$ 차 고조파전류의 피크치 ( $n=1$ , 기본파)

$R_n$  :  $n$ 차 고조파에서 설비의 저항

설비의 저항이 상수(주파수와 독립)인 경우에 동손은 식 (3)과 같다.

$$P_{ca} = \frac{1}{2} R \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = \frac{1}{2} R I_1^2 (1 + (CDF)^2) \text{ [W]} \quad (3)$$

여기서,  $CDF$ (current distortion factor)는 전류 왜형률을 나타내며, 식 (4)와 같이 표현한다.

$$CDF = \frac{1}{I_1} \left( \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

따라서, 고조파 발생에 의해서 동손이 증가하는 것을 결정하는 요인은 전류 왜형률이다. 보통 전기설비의 저항은 주파수에 비례하여 증가한다. 그림 2는 주파수와 구리 도체와의 관계를 나타낸 것이며, 제 7 고조파에서의 저항은 기본파에서의 저항과 비교하여 2배 이상이 되는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 도체 내부의 표피 효과 때문이다. 고조파 손실에서의 표피효과 영향은 큰 도체에서는 중요한 문제이다.

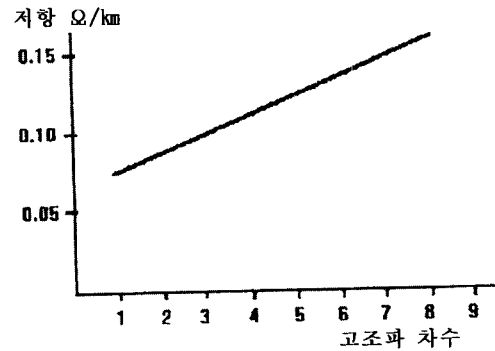


그림 2. 동도체 저항과 주파수 · 전류관계

식 (5)는 동손의 증가율 ( $\epsilon_c$ )을 나타낸 것이며,  $P_c$ 는 고조파 유입시의 동손이며,  $P_{cl}$ 은 기본파 전류  $I_1$ 에서의 동손을 나타낸다.

$$\epsilon_c = \frac{P_c}{P_{cl}} \times 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } P_{cl} = I_1^2 R \times (1 + \beta) \text{ [W]}$$

$$P_c = P_{cl} + I_1^2 R \cdot \sum_{n=2}^{\infty} a_n^2 (1 + \beta \cdot n^m) \text{ [W]}$$

$R$  : 권선의 직렬 저항

$\beta$  : 기본파에 있어서의 표류손실계수

$n$  : 고조파 차수

$a_n$  :  $I_n/I_1 = n$ 차조파 함유율

$m$  : 계수 ( $m = 1.6 \sim 2.0$  정도)

이와 관련하여 제5조파가 10% 포함되어 있을 때  $a = 0.1$ ,  $\beta = 0.25$ ,  $m = 1.8$  이라고 하면, 동손의 증가율은 다음과 같다.

$$P_{cl} = 1.25 I_1^2 R \text{ [W]}$$

$$P_c = 1.31 I_1^2 R \text{ [W]}$$

♣ 알아보기

○ 표피효과 ○

전선에 교류가 흐를 경우에는 전선 내의 전류밀도의 분포는 균일하지 않고 중심부는 소하고 주변부에 가까워질수록 전류밀도가 커지고 있다.

이것은 전선의 중앙부를 흐르는 전류는 전류가 만드는 전자속과 쇄교하므로 전선 단면내의 중심부일수록 자력선 쇄교수가 커져서 인덕턴스가 커지기 때문이다. 그 결과 그림 3과 같이 전선의 중심부일수록 리액턴스가 커져서 전류가 흐르기 어렵고, 전선 표면으로 갈수록 전류가 많이 흐르게 되는 경향을 지니게 된다. 이것을 표피 효과라 한다.

표피 효과는 주파수가 높을수록, 전선의 단면적이 클수록, 도전율이 클수록 그리고 비투자율이 클수록 커진다.

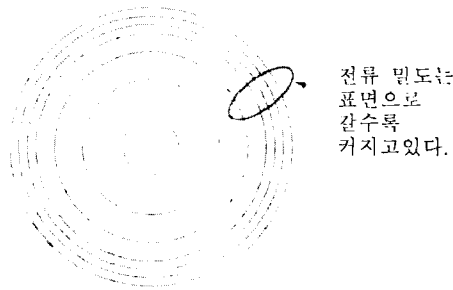


그림 3. 표피 효과의 개념도

따라서,  $\epsilon_c = \frac{1.31}{1.25} \times 100 = 104.8$  [%] 로

서 동손이 약 5[%] 증가한다.

2) 철손

철손은 히스테리시스손과 와류손으로 분류하며, 히스테리시스손은 자성재료와 전류의 주파수에 따라 달라진다. 주어진 자심에 대해 히스테리시스 손실은 식 (6)과 같다.

$$P_h = a_h \cdot f \cdot B_m^V \text{ [W]} \quad (6)$$

여기서,  $a_h$  : 철심의 차원에 의존하는 상수

$f$  : 전류의 주파수

$B_m$  : 자속밀도의 최대치

$V$  : 철심재료에 따라 달라짐(예를 들면,

재료는  $V = 1.5, 2.5$ )

와류손은 철심재료에 따라 다르며, 특히 전류의 주파수 및 자속밀도, 철심 두께에 따라 다르고 식 (7)과 같다.

$$P_e = a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \text{ [W]} \quad (7)$$

여기서,  $a_e$  : 철심의 차원에 의존하는 상수

$f$  : 전류의 주파수

$B_m$  : 자속밀도의 최대치

따라서, 총 철손은 식 (8)과 같다.

$$P_s = a_h \cdot f \cdot B_m^V + a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \text{ [W]} \quad (8)$$

총 철손은 주파수와 최대 자속밀도의 비선형함수라고 할 수 있다. 주어진 전압 고조파에 대해 주파수를 알고 있다면 최대자속밀도는 고조파 전류에 비례한다. 비례항의 상수는 코일과 자속 철심의 설계에 따라 다르다.

이러한 손실의 증가로 인하여 변압기 류 및 권선의 온도 상승을 초래한다. 더욱이 손실의 대부분은 동손이다.

### 3.2 철심의 자화 현상

변압기는 고조파 전류에 따른 철심의 자속으로 인하여 철심에 자화 현상이 일어나며, 그 손실  $P$ 는 식 (9)와 같다.

$$P = K_2 n f \left( \frac{AL}{L} \right) \text{ [W]} \quad (9)$$

여기서,  $K_2$ : 정수,  $f$ : 기본주파수,  $n$ : 고조파 차수이며, 주파수가 높으면 손실이 커진다.

따라서, 고조파가 변압기에 유입되면 소음이 발생하며, 때로는 금속적인 소리나 이상음을 만들기도 한다. 또한 소음의 크기도 평소보다 10~20[dB] 정도 높아지는 일이 있다.

### 3.3 무부하시 변압기 권선과 선로 정전용량 사이의 공진 현상

#### 1) 변압기 포화특성에 의한 고조파

변압기 철심의 자화 특성은 직선성이 아니며, 또한 히스테리시스 현상으로 인하여 변압기에 정현파 교류전압이 인가되면 여자전류는 많은 기수 고조파를 포함한 왜형파가 된다. 그림 4는 변압기의 대표적인 여자전류 파형을 나타낸 것이며, 각 고조파의 크기는 철심의 재질과 자속밀도에 따라 다르지만 일반적인 사용 조건에서는 표 2와 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 제3조파 성분이 가장 크

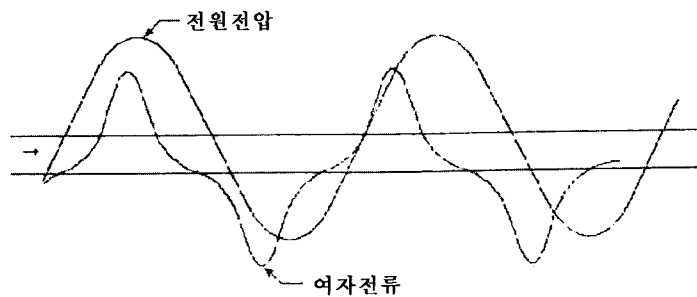


그림 4. 변압기의 대표적인 여자전류 파형

고, 제5, 7조파 순으로 되지만, 제3조파 및 그 배수 조파는 영상성분으로 변압기에  $\Delta$ 권선을 설치하므로서  $\Delta$ 권선내를 순환하기 때문에 제3조파 및 그 배수 고조파는 흡수되고 회로에 나타나지 않는다.

표 2. 여자전류의 고조파 크기

고 조 파	열간 압연규소강판	냉간 압연규소강판
기본파	1	1
제 3고조파	0.15 ~ 0.55	0.4 ~ 0.5
제 5고조파	0.03 ~ 0.25	0.10 ~ 0.25
제 7고조파	0.02 ~ 0.10	0.05 ~ 0.10
제 9고조파	0.005 ~ 0.02	0.03 ~ 0.06
제 11고조파	0.01 이하	0.01 ~ 0.03

이러한 것은 초고압 대형 변압기의 Y-Y인 경우에는 3차 권선을  $\Delta$ 로 설치하고 보통 변압기 권선의 하나는 반드시  $\Delta$ 결선으로 하여 제 3조파의 순환회로로 이용한다. 또 제7조파 이상은 그 양이 미소하기 때문에 거의 문제되지 않고 현실적으로 문제되는 것은 제5조파이다. 제 5조파에 대한 대책은 계통의 선로정수를 고려하여 직렬리액터를 설치하는 것을 검토한다.

#### 2) 여자전류의 고조파 성분에 의한 고조파 전압

변압기 여자전류에는 고조파 성분이 포함되어 있으므로 변압기 단자로부터 계통을 본 고조파 임피던스에 비례한 고조파 전압이 변압기 단자에 나타난다. 그림 5와 같이 무부하인 변압기 1대만을 전원에서 여자한 경우, 일정한 고조파 전류가 흘러  $Z_n$  양단

에는 고조파 전압( $V_n = I_n Z_n$ )이 발생한다.

이 변압기에 고조파 임피던스  $Z_{cn}$ 이 되는 콘덴서를 부하로 연결하면,  $I_n$ 은  $Z_n$ 과  $Z_{cn}$ 으로 분류되고, 부하전류  $I_{cn}$ 과 그의 단자전압  $V_n'$ 는 식(10)으로 구할 수 있다.

$$I_{cn} = I_n \times \frac{Z_n}{Z_n + (X_n + Z_{cn})} = \frac{V_n}{(X_n + Z_{cn})} \quad (10)$$

$$V_n' = I_{cn} Z_{cn} = I_n \times \frac{Z_n}{Z_n + (X_n + Z_{cn})} \times Z_{cn}$$

여기서,  $V_n'$  : 고조파 전압( $Z_n I_n$ )

$Z_n$  : 전원 고조파 임피던스

$I_n$  : 고조파 전류

$Z_{cn}$  : 고조파 임피던스(콘덴서)

$X_n$  : 변압기 누설임피던스의  $n$ 차 고조파의 고조파 임피던스

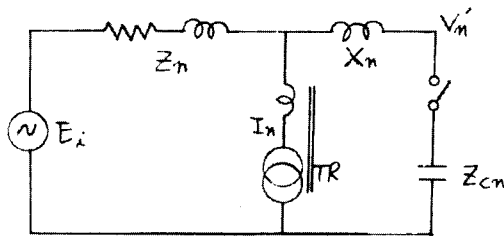


그림 5. 변압기 등가회로

식 (10)에서 변압기 단자측에서 본 임피던스가 전원측과 부하측에서 병렬 공진( $Z_n = -(X_n + Z_{cn})$ )이 형성되면 고조파전류( $I_{cn}$ ) 및 고조파전압( $V_n'$ )은 대단히 커지는 고조파 확대 현상이 발생한다.

이와같이 변압기 여자전류에 의한 고조파가 발생하면 계통 조건(공진)에 따라서는 고조파가 확대되는 현상이 발생할 수 있으므로 유의할 필요가 있다.

### 3.4 절연 열화

절연 열화는 순간적인 1차측 전압 크기와 2차측 전압 증가 비율에 따라 달라진다. 고조파 전압의 발생은 파고치를 증가시켜 절연 열화의 원인이 된다. 고조파 전압으로 인하여 변압기 전압이 높아지고, 절연열화 정도가 빨라진다. 그러나 보통 고조파 레벨에 의한 과전압보다 더 높은 고전압 레벨에 대한 절연이 되어 있어 별 문제가 없다.

## 4. 대책 및 고찰

고조파 전압과 전류에 의한 변압기 손실은 주파수에 의존하는 것으로 알려져 있다. 주파수 증가에 비례하여 손실도 증가하기 때문에 높은 주파수의 고조파는 변압기 과열 원인으로써 저차 고조파 보다도 훨씬 큰 영향을 미친다.

현재 변압기에 대한 고조파의 영향에 대해서 변압기 관리 기준이 마련되어 있는 것이 없으므로 변압기 과열에 미치는 고조파의 영향 및 변압기 수명에 대한 비선형성을 검토할 필요가 있다. 그리고 고조파 전류가 상한치를 초과하는 경우에는 고조파 유출전류를 저감하여 상한치 이내로 억제하기 위한 대책이 필요하다.

이러한 억제 대책에는 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법과 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법, 그리고 고조파에 대해서 장해를 받지 않도록 하는 방법으로 크게 3종류로 나눌 수 있다. 변압기에 대한 고조파의 영향을 저감시키기 위해서는 다음과 같은 종합적인 대책을 검토할 필요가 있다.

(1) 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법 : 변환장치의 다펄스화

(2) 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법

① 리액터(ACL, DCL)의 설치

② 콘덴서의 설치(고압측 또는 저압측)

③ 필터의 설치(수동필터, 능동필터)

(3) 고조파에 대해서 장애를 받지 않도록 하는 방법  
 ① 직렬리액터의 용량 증가(전기저널 2001. 5월호 참조)

- ② 계통 분리
- ③ 변압기의 고조파 내량 증가
- ④ 단락용량의 증대

앞으로 고조파 문제는 부하설비의 다양화, 반도체 응용 기기의 사용이 급증함에 따라서 더욱 더 전력 품질 문제에 나쁜 영향을 미치리라 예상된다. 그러므로 현장의 전기기술자는 고조파 장애의 심각성을 인식하고 향후 전기사용장소에서 고조파로 인한 문제가 최소화되도록 많은 관심을 가져야 한다고 사료됩니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박광현, 정해상, 변압기 기술백과, 경지사, 1990.
- [2] 박민호, 유도기기, 동명사, 1995.
- [3] 강원구, 아몰퍼스 코아 소재 및 변압기의 개발 동향, 대한전기협회지, No. 7, 1990.
- [4] CB 기획센터, 저항·콘덴서·리액턴스, 한진출판사, 1999.
- [5] 이은철, 기기에 미치는 고조파 장애, 전기안전.
- [6] 강창섭, 현장 실측 왜형파의 유형분석, 전기안전.
- [7] 강창섭, 이흥기 외, 고조파가 올드변압기 수명에 미치는 영향, 전기안전.
- [8] 박지현 외, 전기사용장소의 고조파 장애분석 연구, 한국전기안전공사, 1995.
- [9] 인터넷 자료 yeojoo.ac.kr 및 cheryong.co.kr
- [10] 강창원, 고조파SOLUTION, (주)피에스니테크, PSD-H12, 2000.
- [11] 유상봉 외, 고조파에 대한 의문점을 풀어본다. 전력기술인, No. 12, 1999.
- [12] 김세동, 변압기의 특성과 고조파 장애 영향에 대한 고찰, 전기저널, No. 8, 2001.
- [13] 郷古良則, 石津友啓, 受變電マニュアル, 電氣書院, 1998
- [14] 堀越俊夫, 高調波發生のメカニツムとその障害對策, 電氣と工事, 1994.
- [15] 小林義幸, 高調波流出抑制對策, 日本電氣設備學會誌, Vol. 16, No. 4, 1996.

#### ◇ 著 者 紹 介 ◇



김 세 동(金世東)

1956년 3월 3일생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸. 1986년 동대학원 졸. 2000년 서울시립대 전기전자공학부 대학원 졸(박사). '80~'84년 한국전력공사, '84~'97년 한국건설기술연구원 수석연구원 역임. 현재 두원공과대학 전기과 교수, 한양대학교 강사, 기술사, 당학회 편수위원.