

# 건축전기설비기술사 문제 해설

김세동 | 두원공과대학 교수, 공학박사, 기술사(kimse@doowon.ac.kr)

**문제** 고조파가 전력용변압기에 미치는 영향과 대책에 대하여 설명하시오.

☞ 본 문제를 이해하기 위해서는 스스로 문제를 만들고, 답을 써보시오. 그리고, 기억을 오래 가져갈 수 있는 아이디어를 기록한다.

항 목	Key Point 및 확인 사항
가장 중요한 Key Word는?	고조파, 전력용 변압기
관련 이론 및 실무 사항	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 고조파의 뜻을 알고 있나요?</li> <li>2. 전력용변압기의 기본 이론을 알고 있나요?</li> <li>3. 변압기의 손실에 대해서 알고 있나요?</li> <li>4. 손실 중에서 동손과 표피효과에 대하여 어떠한 관계가 있는지 알고 있나요?</li> <li>5. 고조파가 전력용변압기에 어떠한 영향을 주는지 생각해 본 적이 있나요?</li> <li>6. K-Factor에 대해서 알고 있나요?</li> <li>7. 전기수용설비에서 변압기 2차측에 연결되어 있는 고조파발생 부하가 어느 정도이고, 고조파 유출전류가 어느 정도인지 측정해 본 적이 있나요.</li> <li>8. 전력용변압기로부터 고조파 장애를 줄이는 방법도 알고 있나요? 매우 중요한 사항이므로 확인해야 합니다.</li> </ol>

## 해설

### 1. 고조파의 개념

기본이 되는 주파수를 기본파 또는 기본주파수라고 한다. 고조파는 기본주파수에 대해 2배, 3배, 4배와 같이 정수의 배에 해당하는 물리적 전기량을 말한다. 즉 우리나라의 경우 제2고조파는 120Hz, 제3고조파는 180Hz의 주파수를 갖는다. 다시말해서, 고조파는 '정현파가 아닌 파형'을 말하며, 왜형파 혹은 왜곡파라 하고, 영문으로 'Harmonic'이라고 한다.

2. 고조파가 변압기에 미치는 영향

변압기에 고조파 전류가 흐르는 경우 누설 자속이 고조파의 영향을 받고, 이 고조파 자속에 의해 권선의 와류손(누설자속이 권선을 쇄교하면서 발생하는 손실)과 기타 표류 부하손(누설자속이 외함, 클램프, 철심 표면을 쇄교하면서 발생하는 손실)이 증가하여 변압기의 온도 상승을 초래하므로 사용중인 변압기는 용량을 감소하여 운전하여야 한다.

고조파가 전력용변압기에 미치는 영향은 다음과 같이 분류할 수 있다.

1) 고조파 전류 중첩에 의한 동손, 철손 증가

(1) 동손

동손은 식 (1)를 이용하여 계산할 수 있다.

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

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

$R_n$  :  $n$ 차 고조파에서 설비의 저항

① 전류 왜형률과의 관계

설비의 저항이 상수(주파수와 독립)인 경우에 동손은 식 (2)와 같다.

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

여기서,  $CDP$ (current distortion factor)는 전류 왜형률을 나타내며, 고조파 발생에 의해서 동손이 증가하는 것을 결정하는 요인은 전류 왜형률이다.

② 표피 효과의 영향

보통 전기설비의 저항은 주파수에 비례하여 증가한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제7 고조파에서의 저항은 기본파에서의 저항과 비교하여 2배 이상이 되는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 도체 내부의 표피 효과 때문이다. 고조파 손실에서의 표피효과의 영향은 큰 도체에서는 중요한 문제이다.

식 (3)은 동손의 증가율( $\varepsilon_c$ )을 나타낸 것이며,  $P_c$ 는 고조파 유입시의 동손이며,  $P_{cl}$ 은 기본파전류  $I_1$ 에서의 동손을 나타낸다.

$$\varepsilon_c = \frac{P_c}{P_{cl}} \times 100 \text{ [%]} \dots \dots \dots (3)$$

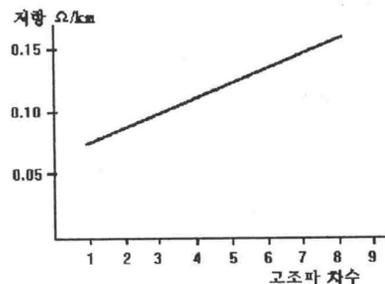


그림 1. 동도체 저항과 주파수 · 전류관계

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

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

이와 관련하여 제5차조파가 10% 포함되어 있을 때 동손이 약 5[%] 증가한다.

(2) 철손

철손은 히스테리시스손과 와류손으로 분류하며, 식 (4)와 같다.

$$P_s = a_h \cdot f \cdot B_m^V + a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \text{ [W]} \dots \dots \dots (4)$$

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 변압기류 및 권선의 온도 상승을 초래하게 되며, 손실의 대부분은 동손이다.

2) 철심의 자화 현상으로 인한 이상음 발생

변압기는 고조파 전류에 따른 철심의 자속으로 인하여 철심에 자화 현상이 일어나며, 그 손실은 식 (5)와 같다.

$$P = K_2 n f \left( \frac{\Delta L}{L} \right) \text{ [W]} \dots \dots \dots (5)$$

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) 무부하시 변압기 권선과 선로 정전용량 사이의 공진 현상

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

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

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.

3. 대책

현장에서 인버터류 및 UPS로 인하여 전력용변압기에 고조파 전류가 흐르는 경우, 앞에서 지적

한 바와 같이 전력용변압기의 온도 상승으로 운전 전류를 감소하여 운전하거나, 다음과 같은 적절한 고조파 제거 대책을 세운 후 운전하여야 한다.

- 1) 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법
  - ① 변환장치의 다펄스화
  - 2) 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법
    - ① 리액터(ACL, DCL)의 설치
    - ② 전력용콘덴서의 설치(고압측 또는 저압측)
    - ③ 필터의 설치(수동필터, 능동필터)
  - 3) 고조파에 대해서 장애를 받지 않도록 하는 방법
    - ① 직렬리액터의 용량 증가
    - ② 계통 분리
    - ③ 전력용변압기의 고조파 내량 증가
    - ④ 단락용량의 증대

ANSI Std. C57. 110-1998에 의하면, K-Factor로 인한 변압기 출력 감소율에 대해서 규정하고 있다. 여기서, K-Factor이란, 비선형 부하들에 의한 고조파의 영향에 대하여 변압기가 과열 현상없이 안정적으로 공급할 수 있는 능력을 말한다.

#### 추가 검토 사항

☞ 공학을 잘 하는 사람은 수학적인 사고를 많이 하는 사람이란 것을 잊지 말아야 한다. 본 문제에서 정확하게 이해하지 못하는 것은 관련 문헌을 확인해 보는 습관을 길러야 엔지니어링 사고를 하게 되고, 완벽하게 이해하는 것이 된다는 것을 명심하기 바랍니다. 상기의 문제를 이해하기 위해서는 다음의 사항을 확인바랍니다.

#### 1. 표피효과에 대해서 알고 있나요.

직류전류가 전선을 통과할 때는 전부 같은 전류밀도로 흐르지만, 주파수가 있는 교류에 있어서는 전선의 외측 부근에 전류밀도가 커지는 경향이 있다. 이같은 현상을 전선의 표피효과(Skin Effect)라 한다. 이 이유는 전선 단면내의 중심부일수록 자속쇄교수가 커져서 인덕턴스가 증대하므로 중심부에는 전류가 잘 흐르지 못하고 표면으로 몰려 흐르게 되기 때문이다.

따라서, 전선에 직류가 흐를 때 보다 직류와 같은 크기의 실효치 교류가 흘렀을 때 전력손실이 많아지는데, 전선내의 평균 전력손실을 전류의 2승의 평균치로 나눈 값을 실효 교류저항이라고 하며, 이 실효저항을 직류저항으로 나눈 값을 표피효과 저항비( $\frac{R}{R_0}$ )라고 한다. 표피효과 저항비는 전선단면적이 커질수록, 주파수가 증대될수록 커져서 표피효과 현상이 두드러지게 나타난다. 그러나, 일반 송전선은 연선을 사용하므로 소선 자체가 가늘기 때문에 표피효과는 그다지 문제시 되지 않으며, 직류저항을 그대로 교류저항으로 보아도 좋다.

2. ANSI Std. C57. 110-1998에서 정하고 있는 K-Factor로 인한 변압기 출력감소율(THDF : Transformer Harmonics Derating Factor)은 다음과 같다.

$$THDF = \sqrt{\frac{P_{LL-R}}{P_{LL}}} \times 100 = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + (K-Factor) \times P_{EC-R}}} \times 100$$

여기서,  $P_{LL-R}$ : 정격에서의 부하손  $P_{LL}$ : 고조파전류를 감안한 부하 손실  $P_{EC-R}$ : 와전류손  
예를 들면,

1) 몰드변압기에서 K-Factor가 1일 경우(비선형부하가 없다)

$$THDF = \sqrt{\frac{1+0}{1+(1 \times 0)}} \times 100 = 100\%$$

2) 몰드변압기에서 K-Factor가 13일 경우(대부분이 3상 비선형부하이다), 와전류손이 14% 발생한다. 아래 식에서 보는 바와 같이 3상 비선형부하가 대부분이 연결되어 있는 경우에는 변압기용량의 64%만 부하를 걸어야 안전하다는 결과이다. 따라서, 이러한 부하 특성을 가지는 경우 설계단계에서의 변압기용량은 부하설비용량에 1.5배에서 2배 정도를 고려하여 계산하게 된다.

$$THDF = \sqrt{\frac{1+0.14}{1+(13 \times 0.14)}} \times 100 = 64\%$$

3. K-Factor를 수식으로 나타내면 아래의 식과 같으며, 변압기 2차측에서 발생한 고조파전류를 측정하여 차수별로 수식에 넣어 계산하면 K-Factor를 계산할 수 있고, 표에서 K-Factor값을 적용하면 변압기 2차측에 연결된 부하의 특성을 대략 알 수 있다.

$$K-Factor = \sum (h^2 I_h^2)$$

K-Factor 값	부하 특성
1	순수한 선형 부하, 찌그러짐의 현상이 없다.
7	3상 부하중 50% 비선형부하, 50%의 선형 부하
13	3상의 비선형부하
20	단상과 3상의 비선형부하
30	순수한 단상 비선형부하



1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1986년 동대학원 졸업,  
2000년 서울시립대학교 전기전자공학부 대학원 졸업(공학박사),  
한국전력공사 건설처 근무, 한국건설기술연구원 수석연구원 역임,  
현재 두원공과대학 교수, 건축전기설비기술사,  
당 협회 편수위원, 내선규정전문위원회 위원