

중성선 영상고조파 전류 측정사례와 저감대책 ②

(주)피에스디테크 대표이사/ 기술사 강 창 원



목 차

1. 영상고조파 전류의 발생원리와 발생원
2. 영상고조파 전류의 측정사례
3. 영상고조파 전류의 영향
 - 가. 변압기 과열 및 손실
 - 나. 중성선 케이블 과열 및 소손
 - 다. 중성선 대지전위 상승
 - 라. 역률저하
 - 마. 변압기 출력감소
 - 바. OCGR 동작
 - 사. ACB/MCCB 동작
4. 영상고조파 전류 저감기기 소개
5. 설치 전후 측정비교
6. 결과고찰

(2) 변압기의 철손 증가

• 철손증가율 :

$$e_c = (W_c/W_{c1}) \times 100(\%)$$

$$W_{11} = K_1 \times f \times \left(\frac{E_a}{f}\right)^m + K_2 \times (k_f + E_a)^2$$

W_{11} : 기본과제압 여자시 철손,
 E_a : 고조파 포함한 여자 전압 평균치,
 m : 스타인메쯔의 정수(1.6~2.0),
 k_f : 고조파 포함한 여자전압 파형들,
 $K_1 > 1$, 기본파만일 경우 $K_1 = 1$, K_1, K_2 : 정수

(3) 변압기의 권선온도 상승

• 권선온도상승 : $\Delta \theta_0 = \Delta \theta_1 \times \left(\frac{I_c}{I_1}\right)^{1.5}$

I_1 : 기본파전류,
 $\Delta \theta_1$: 기본파전류에 의한 권선온도 상승,
 $\Delta \theta_0$: 유입변압기의 온도상승,
 I_c : 고조파전류를 포함한 등가전류

[예제] 고조파 전류를 포함한 등가전류 800A,
기본파전류 650A인 경우

$$\begin{aligned} \Delta \theta_0 &= \Delta \theta_1 \times (800/650)^{1.6} \\ &= \Delta \theta_1 \times 1.394 \text{ (약 39\% 증가)} \end{aligned}$$

또한 $\Delta \theta_1 = \Delta \theta_0 \times 0.717$

그러므로 기본파에 의한 온도상승 $\Delta\theta$ 은 고조파전류를 제거하게 되면 약 28% 정도 온도상승이 감소하게 된다.

나. 중성선 Cable 과열 및 소손

일반적으로 중성선의 굵기는 다른 상에 비하여 같거나 가늘게 선정하고 있는데 (그림 3)과 같이 영상분 고조파에 의하여 중성선에 많은 전류가 흐르게 되면 케이블이 과열된다. 또한, 제 3고조파는 기본파의 3배인 180Hz의 주파수 성분을 갖기 때문에 표피효과에 의해 케이블의 유효단면적을 감소시켜 저항의 증가현상으로 과열 현상은 더욱 크게 된다.

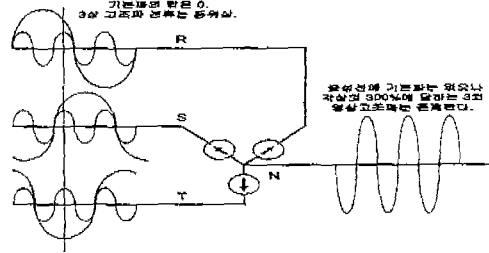
- 교류도체저항 증가 \rightarrow 전류의 증가 \rightarrow 케이블 과열
- 교류저항 : $R_{AN} = R_D \times (1 + \lambda_g + \lambda_p)$
- R_D : 직류도체저항, λ_g : 표피효과계수,
- λ_p : 근접효과계수

[용어설명]

- 표피효과 : 주파수가 높아지거나 도선을 및 투자율이 클수록 도체내부에는 전류 및 자속이 존재하지 않는 현상
- 표피두께(Skin Depth) : 모든 전류가 동일한 손실을 갖고 흘러야만 하는 도선에서 등가의 전류관통 깊이(Current Penetration Depth)를 말한다. Skin Depth는 오직 주파수 및 도선 특성과 함수관계를 가진다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (f: \text{주파수}, \mu: \text{투자율}, \sigma: \text{도전율})$$

- 근접효과(Proximity Effect) : 두 개의 평행으로 위치한 원형 전선에 교류 전류가 흐를 때, 교류 전류는 도선(Conductors)의 주위를 균일하게 분포되어 흐르지 않는다. 각 전선의 자계(Magnetic Fields)는 다른 전선의 전류 흐름에 영향을 미치며, 이것은 전류의 흐름이 도선 내에서 균일하지 않게 만들 뿐만 아니라 도선의 저항을 증가시킨다. 평행하게 놓인 원형의 전선에서 나타나는 현상



[그림 3] 케이블 과열

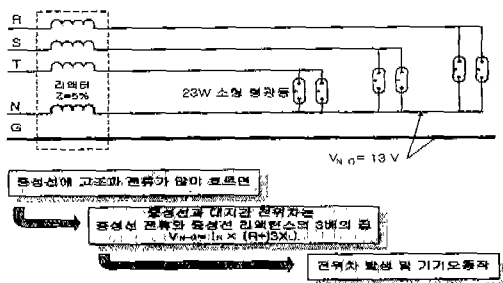
[표 8] 고조파 차수에 따른 표피효과계수와 교류도체저항의 증가

전선굵기	직류도체 저항(R _D) Ω/km 90°	기본파(60Hz)		3고조파(180Hz)			
		표피효과 계수(AS)	교류도체 저항(R _D) Ω/km	표피효과 계수(AS)	교류도체 저항(R _D) Ω/km	R _D (180 Hz)/R _D (60Hz)	
600V CV	100SQ×1C	0.2330	0.00217	0.234	0.0193	0.370	1.017
	150SQ×1C	0.1560	0.00487	0.157	0.0426	0.163	1.040
	200SQ×1C	0.1170	0.00864	0.118	0.0737	0.126	1.065
	250SQ×1C	0.0942	0.01320	0.095	0.1096	0.105	1.095
	325SQ×1C	0.0742	0.02218	0.074	0.1752	0.085	1.150
	400SQ×1C	0.0589	0.03322	0.061	0.2478	0.073	1.208
	500SQ×1C	0.0471	0.05131	0.05	0.3513	0.064	1.285
	600SQ×1C	0.0393	0.07237	0.042	0.4535	0.057	1.355
	800SQ×1C	0.0295	0.02588	0.039	0.2904	0.035	1.170
1000SQ×1C	0.0238	0.03907	0.025	0.2831	0.031	1.235	
600V CV	100SQ×3C	0.0238	0.00208	0.239	0.0185	0.247	1.033
	150SQ×3C	0.1580	0.00472	0.16	0.0412	0.172	1.074
	250SQ×3C	0.0961	0.01263	0.093	0.1057	0.116	1.178
	325SQ×3C	0.0738	0.02136	0.077	0.1695	0.097	1.258
6.600V CV	100SQ×1C	0.2380	0.00208	0.239	0.0185	0.246	1.027
	150SQ×1C	0.1580	0.00472	0.159	0.04124	0.169	1.061
	250SQ×1C	0.0961	0.01263	0.098	0.1057	0.113	1.150
325SQ×1C	0.0738	0.02138	0.077	0.1696	0.094	1.230	
전선굵기	표피효과 계수(AS)	5고조파(300Hz)		7고조파(420Hz)			
		교류도체 저항(R _D) Ω/km	R _D (180 Hz)/R _D (60Hz)	표피효과 계수(AS)	교류도체 저항(R _D) Ω/km	R _D (180 Hz)/R _D (60Hz)	
600V CV	100SQ×1C	0.0521	0.245	1.020	0.0993	0.256	1.100
	150SQ×1C	0.1115	0.173	1.106	0.2018	0.187	1.196
	200SQ×1C	0.1858	0.139	1.176	0.3205	0.156	1.309
	250SQ×1C	0.2647	0.119	1.248	0.4367	0.136	1.408
	325SQ×1C	0.3942	0.101	1.364	0.6097	0.117	1.575
	400SQ×1C	0.5205	0.09	1.472	0.7646	0.104	1.708
	500SQ×1C	0.679	0.079	1.597	0.9485	0.092	1.853
	600SQ×1C	0.8194	0.072	1.697	0.108	0.083	1.966
	800SQ×1C	0.4399	0.042	1.404	0.667	0.050	1.625
1000SQ×1C	0.577	0.038	1.518	0.8311	0.044	1.762	
600V CV	100SQ×3C	0.05	0.262	1.094	0.0944	0.28	1.17
	150SQ×3C	0.1089	0.191	1.196	0.1964	0.213	1.336
	250SQ×3C	0.2563	0.139	1.403	0.4248	0.161	1.629
	325SQ×3C	0.3836	0.12	1.559	0.5961	0.141	1.826
6.600V CV	100SQ×1C	0.05	0.257	1.076	0.0944	0.273	1.141
	150SQ×1C	0.1083	0.186	1.164	0.1964	0.206	1.287
	250SQ×1C	0.2563	0.134	1.358	0.4248	0.154	1.567
325SQ×1C	0.3836	0.116	1.507	0.5961	0.136	1.759	

다. 중성선 대지전위 상승

중성선에 제3고조파 전류가 많이 흐르면 중성선과 대지간의 전위차는 중성선전류와 중성선리액턴스의 3배의 곱 $V_{N-G} = I_N \times (R + j3X_L)$ 이 되어 큰 전위차를 갖게 된다.

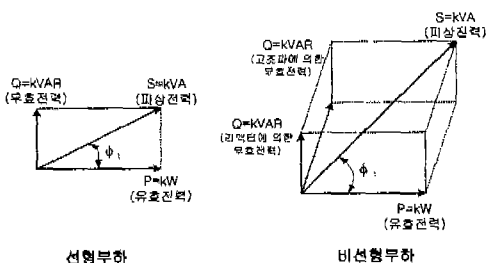
일반적으로 중성선의 대지전위가 수V 이하이면 실용적으로 문제가 없으나 현장의 측정결과 5V~15V 정도의 전위차가 측정된다. 이와같은 경우 정밀기기의 오동작, 전력전자 소손 등의 원인이 되고 있다.



[그림 4] 중성선 고조파 전류에 의한 대지전위 상승

라. 역율저하

역율이라하면 일반적으로 [그림 5] 왼쪽 그림과 같이 전동기 등 리액턴스 성분만 고려하여 $PF = \cos\phi$ 라 하고 있지만 비선형 부하에서는 고조파 전압과 고조파 전류에 의한 왜곡전력도 무효분으로 작용하여 [그림 5] 오른쪽과 같이 3차원적으로 해석하여야 한다. 즉 리액턴스 성분에 의한 무효분이 작더라도 왜곡전력이 크면 무효분이 크게 되어 역율이 저하하게 된다. 현장의 측정결과 일반적인 OA빌딩의 사무용 기기의 역율은 85% 정도, 인버터 설치에 의한 역율은 70~80% 정도로 측정되고 있다.



[그림 5] 중성선 영상고조파 전류에 의한 역율저하 ($\cos\phi_1 < \cos\phi_2$)

마. 변압기 출력감소

변압기에 고조파가 함유되면 전류파형의 끝이 뾰족한 침부파형의 형태로 되거나 과열현상에 의하여 변압기 출력이 저하되고, THDF(Transformer Harmonic Derating Factor : 고조파에 의한 변압기 용량 감소계수)로 3상 또는 단상 일 때의 변압기 출력 감소를 계산할 수가 있다.

(1) 3상 정류기 부하가 몰드변압기 1000kVA에 연결되어 있는 경우에 P_{EC-R} (와류손실)는 [표 9], K-Factor는 [표 10]의 값들을 식(2.19)에 대입하면 28.6%로 변압기 출력이 감소됨을 알 수 있다. 따라서, 1000kVA 변압기라 하여도 최대로 운전할 수 있는 용량이 714kVA임을 알 수 있다.

$$THDF = \sqrt{\frac{P_{LL(R(PU))}}{P_{LL(PU)}}}$$

$$= \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R(PU)}}{1 + K \cdot \text{Factor} \cdot P_{EC-R(PU)}}}$$

$$THDF = \sqrt{\frac{1 + 0.14}{1 + 13 \times 0.14}} = 28.6\%$$

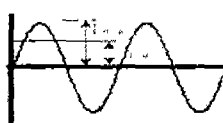
실제 변압기 용량 : 1000kVA(정격용량)
 $\times (100\% - 28.6\%)$
 $= 714kVA$

[표 9] 용량별 P_{EC-R} (와류손실)

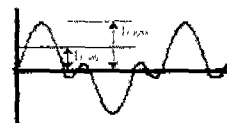
Type	MVA	P_{EC-R} (와류손실:%)
건식·몰드	1이하	5.5
	1초과	14
유입	2.5이하	1
	2.5초과~5이하	2.5
	5초과	12

[표 10] 부하특성에 따른 K-Factor

K-Factor	부 하 특 성
7	50% 3상 비선형부하, 50% 3상 선형부하
13	100% 3상 비선형부하
20	50% 단상 비선형부하, 50% 3상 비선형부하
30	100% 단상 비선형 부하



[그림 6(a)]



[그림 6(b)]

(2) 단상 고조파 부하인 경우

{그림 6(b)}와 같이 기본파에 3고조파가 함유되어 있으면 끝이 뾰족한 왜형파가 나타나게 된다. 변압기에 정현파 전류가 흐를 때와 피크값이 높은 왜형파가 흐를 때 변압기에 미치는 영향은 다르게 나타나게 되고 다음과 같은 식으로 변압기 출력을 계산할 수 있다.

$$THDF = \frac{\sqrt{2}I_{rms}}{I_{peak}} \text{ --- 식(2.20)}$$

{그림 6(a)}과 같이 정현파 전류가 흐를 때

$$THDF = \frac{\sqrt{2}I_{rms}}{I_{peak}} = 1 \text{ 이 되어 변압기 출력 감}$$

쇄율은 적용되지 않는다. 그러나 제3고조파에 의한 왜형파 전류가 흐르면 40~60% 정도로 변압기 출력이 저하하게 된다.

$$THDF = \frac{\sqrt{2}I_{rms}(30\% \sim 40\%)}{I_{peak}} = 40 \sim 60\% \text{ --- 식(2.21)}$$

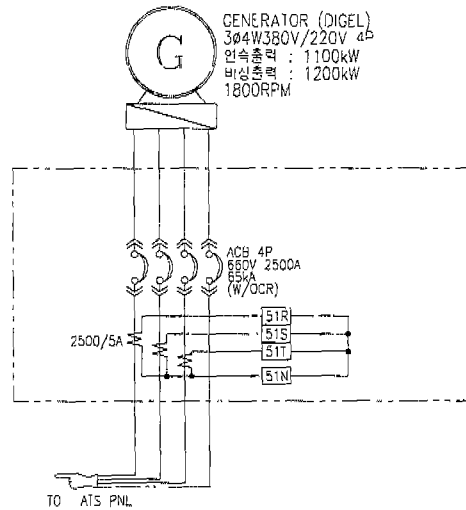
즉, 1000KVA 변압기라 하더라도 실제 출력은 400~600KAV 정도밖에 안되는 경우가 대부분이다.

바. OCGR 동작

{표 11}은 ○○백화점 고조파 전류를 측정한 데이터이고 {그림 7}은 그 계통도를 나타내고 있다. 중성선에 상전류 만큼은 아니지만 매우 많은 고조파 전류가 흐르고 있다. 이는 대부분이 3차 영상고조파 전류인데 이처럼 영상고조파 전류가 다 량으로 흐를 경우 계전기는 아래식에 의해서 동작을 일으킬 수 있다.

{표 11} ○○백화점 고조파 측정자료

발전기 부하량	구분	R상	S상	T상	N상	비고	
240 kW	모선	전류	375A	391A	342A	111A	
		고조파(THD)	12.46%	15.97%	14.15%	564%	
	CT 2차	전류	0.75A	0.78A	0.68A	0.22A	
		고조파(THD)	12.46%	15.97%	14.15%	563.9%	
490 kW	모선	전류	727A	808A	783A	265A	계전기동작
		고조파(THD)	11.76%	13.69%	11.18%	687%	
	CT 2차	전류	1.45A	1.61A	1.57A	0.53A	계전기동작
		고조파(THD)	11.76%	13.69%	11.18%	678%	



{그림 7} ○○백화점 비상발전기 계통현황

유도형 계기의 구동토크 $T = K\omega\psi_2 \sin\theta - K_s$ 위의 식에서처럼 유도형 계기의 구동토크는 ω 에 비례하므로 다량의 영상고조파 전류를 포함하고 있을 경우 ω 가 커지고 구동토크도 커지게 된다. 실제로 이 백화점에서는 OCGR이 동작하여 차단기가 동작된 사례가 있는데 이것은 비상발전기 투입시 1.0A(60Hz)에 동작하게 되어있는 계전기에 다량의 고조파전류(CT2차측 0.53A)가 함유되어 있을 경우에는 실제로 지락 사고가 일어나지 않더라도 영상고조파 전류의 주파수는 기본파의 3배의 주파수이므로 계전기 원판의 구동토크 T를 충분히 동작시킬 수 있는 힘이 되어 동작을 일으키게 된 것이다.

“성실함은 하늘의 길이요,
성실해지려고 노력함은 사람의 길이다.”

(誠者天之道也 誠之者人之道也)

-<중용(中庸) : 사서(四書)의 하나>-

다음호에 계속됩니다