

케이블 중성선 과전류 원인 및 대책

한국전력기술인협회 부설전력기술연구원/ 원장 정 연 해
과장 이 기 철
(주)피에스디테크 대표이사/ 기술사 강 창 원
이사 한 성 배

본 내용은 협회부설 전력기술연구원과 (주)피에스디테크가 에너지관리 공단에서 공모한 “에너지 자원기술개발” 연구과제로 선정되어 2001년 6월부터 공동연구하는 과제” 전기 수용설비의 중성선 영상분 고조파 전류 저감장치개발”로서 본 연구를 하면서 우리 협회회원과 전력기술인들이 당면하는 관련 사항을 본 연구에서 발췌하여 게재한 것이오니 많은 참조 바랍니다.

1. 서론

중성선의 전류를 실측할 때 상전류보다 중성선에 흐르는 전류가 훨씬 많아 현장의 담당자를 어리둥절하게 만든다. 심한 경우에는 중성선 전류가 상전류보다 너무 커 누전에 의한 것이 아닌가 하는 의구심을 갖게 한다. 최근 OA기기(정류기, 컴퓨터, 복사기, 프린터, UPS 등)를 많이 쓰는 Office빌딩은 모두 이 문제를 갖고 있다고 하여도 과언이 아닐 것이다. 이로 인하여 대지전위가 상승하여 정밀 제어기기의 오동작원으로 작용한다. 또한, 변압기, MCCB, 케이블 등 과열의 원인이 되고 있으며 심한 경우에는 화재사고로 이어진다.

2. 중성선 과전류 원인 및 현황

1) 고조파 전류는 전원측으로 유출된다.

일반적으로 전력의 흐름은 전원측에서 부하측으로 흐르나(전압원) 고조파 전류는 전류원이므로 부하측(고조파 발생원)에서 유출된다. 요즘 사용이 증가하고 있는 Power electronics 응용기기(정류기, UPS, V.V.V.F, 컴퓨터 등)는 파형을 왜곡시키는 비선형 특성을 가지고 있으며 이때 발생하는 고조파 전류는 그림1과 같이 부하측에 고조파 정전류원이 있는 것으로 간주하여 전원측으로 유출된다고 생각하면 된다.

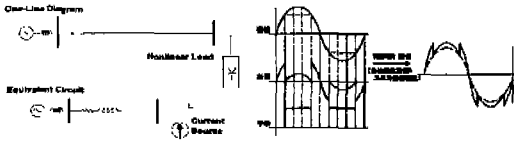


그림1 고조파 전류 발생 및 유출

이와 같이 전원측으로 유출되는 고조파 전류는 Power electronics 응용기기의 사용증가에 따라 점점 증가하고 있으며 이와 비례하여 계통에 미치는 영향도 커지고 있다.

2) 영상분 고조파

고조파의 성분을 분석하면 정상분, 역상분, 영상분으로 나뉘는데 이는 4차, 7차, 10차 ... 등의 정상분 고조파와 2차, 5차, 8차, 11차 등의 역상분 고조파, 그리고 3차, 6차, 9차, 12차 등으로 표시되는 영상분 고조파로 나눌 수 있다.

표1 대칭좌표에 의한 고조파 구분

구분	벡터도	고조파
정상분 고조파		$3N+1 : 4, 7, 10, 13 \dots$
역상분 고조파		$3N-1 : 2, 5, 8, 11, 14 \dots$
영상분 고조파		$3N : 3, 6, 9, 12, 15 \dots$

이것은 다음과 같이 간단히 표시할 수도 있다.

고조파 차수	1 (기본파)	2 차	3 차	4 차	5 차	6 차	7 차	8 차	9 차	~
대칭분 요소	+	-	0	+	-	0	+	-	0	~

3) 영상분 고조파의 발생원

고조파 발생차수를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$h = nP \pm 1$$

h : 고조파 발생 차수
 n : 정수 (1, 2, 3, 4, 5, ...)
 P : 정류기 상수 (단상정류기 = 2, 6상정류기 = 6, 12상정류기 = 12)

위의 식에서 정류기 상수별 발생하는 고조파 차수는 다음과 같다.

표2 정류기 상수별 발생 고조파 차수

상 수	식	발생 차 수							
		3	5	7	9	11	13	23	24
단상 (P=2)	$2 \times 2 \pm 1 = 3, 5$ $3 \times 2 \pm 1 = 7$	○	○	○	○	○	○	○	○
6상 (P=6)	$1 \times 6 \pm 1 = 5, 7$ $2 \times 6 \pm 1 = 11, 13$	x	○	○	x	○	○	○	○
12상 (P=12)	$1 \times 12 \pm 1 = 11, 13$ $2 \times 12 \pm 1 = 23, 25$	x	x	x	x	○	○	○	○

위의 표에서 단상정류기는 3, 9 고조파 즉, 영상분 고조파가 발생하나 6상 및 12상 정류기에서는 영상분 고조파가 발생되지 않음을 알 수 있다.

표3 단상정류기의 고조파 측정 Data

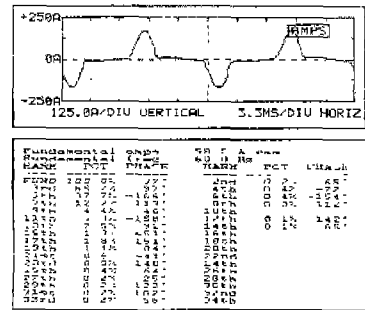
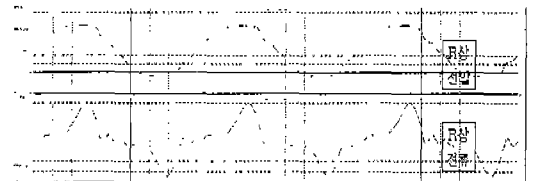


표3은 단상정류기에서 발생하는 고조파를 측정 한 것으로 측정 Data에서 알 수 있듯이 제3고조파가 기본파의 65.7%, 제5고조파가 37.7%, 제7고조파가 12.7% 로 나타나고 있다.

컴퓨터, 복사기, 자판기, 전자식안정기 등 단상정류기에서는 주요 발생고조파가 영상분 고조파인 제 3고조파임을 알 수 있다.

4) 중성선 과전류 측정사례 및 분석

다음 그림2는 방송국 저압 3상 4선식의 주 간선에서 R상의 전압, 전류와 중성선(N)의 전압, 전류를 측정 한 값이다. 파형의 그림에서와 같이 R상에는 60Hz의 전류가 N상에는 180Hz(제3고조파)의 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다.



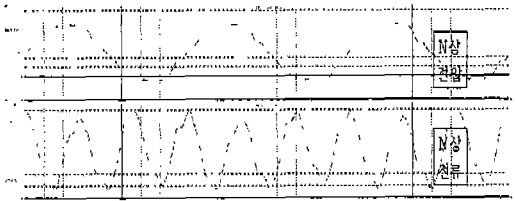


그림2 ○○방송국 저압 간선의 R상, N상 전압, 전류 파형

측정 전류값을 수치로 나타내면 다음과 같다.
- 각 차수별 전류 크기 및 고조파 함유율

구분	기본파		3고조파		5고조파		7고조파		9고조파		실효치	
	%	A	%	A	%	A	%	A	%	A	THD	(rms/A)
R상	100	130.6	52.8	68.9	30.7	40.1	12.2	15.9	7.4	9.6	63.9	155.0
N상	100	22.4	938.4	210.1	14.1	3.2	32.2	7.2	125	71.8	950.9	214.0

- R상에는 기본파 전류가 130.6A로 가장 크고 3고조파 전류가 기본파의 52.8%인 68.9A가 흐르는 반면 N상에는 기본파 전류가 22.4A 정도 흐르고 있으나 3고조파 전류는 기본파의 938.4%인 210.1A 흐르고 있다.
- R상에는 기본파 전류가 130.6A가 흐르며 N상에는 그 벡터합으로 0A가 흘러야 하지만 부하불평형에 의하여 22.4A 정도 흐르고 있다.
- R상의 3고조파 전류는 68.9A이며 N상의 3고조파 성분은 개략 3배인 210.1A가 흐르고 있고 기본파 전류와 합성되어 214A가 흐르고 있다.
- 이와 같은 영상분 고조파에 의하여 R상에는 155A가 흐르고 있으나 N상은 이보다 큰 214A가 흐르고 있다.

5) 영상분 고조파전류와 중성선 과전류와의 관계
평형상태의 R, S, T 상은 각각 120°의 위상차를 가지고 있어 그 중성선은 R, S, T 각 상의 벡터합 즉, $I_R + I_S + I_T = 0$ 이 된다. 그러나 그림3과 같이 R상에 흐르는 제3고조파, S상에 흐르는 제3고조파, T상에 흐르는 제3고조파의 위상이 같기 때문에 중성선에는 벡터합이 아니고 각각의 스칼라합이 흐르게 된다. 이러한 이유로 중성선에 흐르는 전류는 부하 평형시에도 0이 아니고

상전류보다 큰 값이 되어 전류가 흐른다.

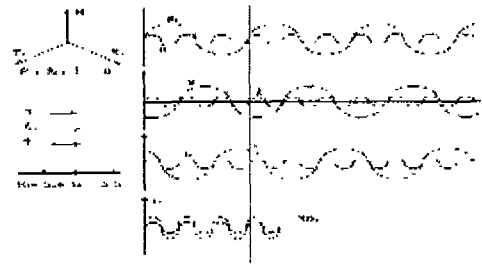


그림3 중성선의 제3고조파 전류 확대현상

이를 이론적으로 풀이해 보면, 부하 평형시 기본파의 각 선전류는

$$I_{R1} = I_m \times \sin \omega t$$

$$I_{S1} = I_m \times \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_{T1} = I_m \times \sin(\omega t - 240^\circ)$$

로 표시되며, 각 선전류의 합은

$$I_{R1} + I_{S1} + I_{T1} = I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 0$$

이 되고,

동위상인 제3고조파 전류는

$$I_{R3} = I_m \times \sin 3\omega t$$

$$I_{S3} = I_m \times \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_m \times \sin 3\omega t$$

$$I_{T3} = I_m \times \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_m \times \sin 3\omega t$$

로 표시되어, 각 선전류의 합은

$$I_{R3} + I_{S3} + I_{T3} = I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3\omega t = 3 \times I_m \sin 3\omega t$$

가 된다.

6) 중성선 영상분 고조파전류의 영향

가. 변압기 과열

비선형 부하에서 발생되는 고조파전류는 전원측으로 유출되므로 그림4에서와 같이 유출되는 영상분 고조파는 변압기 1차로 변환되어 부하 평형시 권선내를 순환하게 된다. 이 순환하는 전류

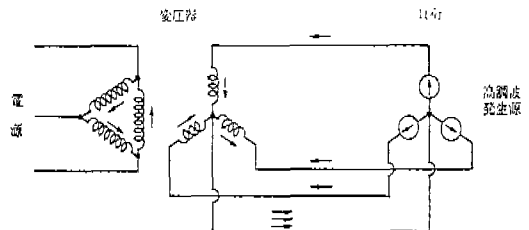


그림 4 변압기 1차 스칼라합을 순환하는 영상분 고조파 전류

가 열로 바뀌게 되어 열이 많이 발생하게 되는데 빌딩에서 사무용기기(단상정류기)를 많이 사용할수록 열이 많이 발생하게 됨을 알 수 있으며 이는 변압기의 와전류 손실 및 표피효과에 의한 영향에 증폭되어 변압기의 열화를 촉진하게 되고, 전력손실도 증가하게 된다.

나. 중성선케이블 과열

일반적으로 중성선의 굵기는 다른 상전선과 똑같이 선정하고 있는데 그림5와 같이 영상분 고조파에 의하여 중성선에 많은 전류가 흐르게 되면 전류의 제곱에 비례하여 케이블이 과열된다. 또한, 제3고조파는 기본파의 3배인 180Hz의 주파수 성분을 갖기 때문에 케이블의 표피효과에 의해 케이블의 유효단면적을 감소시켜 저항의 증가현상으로 과열현상은 더욱 기증된다.

balanced fundamental currents sum to 0, but balanced third-harmonic currents coincide

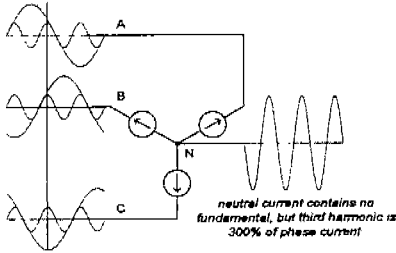
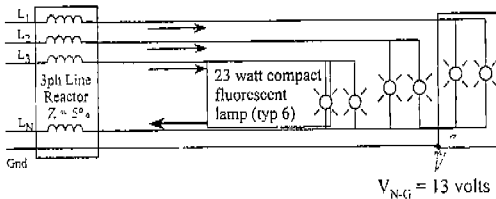


그림5 중성선 과열

다. 중성선 대지전위 상승

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



라. 통신선 유도장해 증가

중성선에 제3고조파 전류가 많이 흐르면 통신

선의 유도장해가 가증된다.

$$V_{TIF} = \frac{\sum_{h=1}^n (T_h \times Z_h \times I_h)^2}{V_1}$$

V_1 : 기본파 상전압(상-중성선 rms)

I_h : 각 차수별 고조파 전류

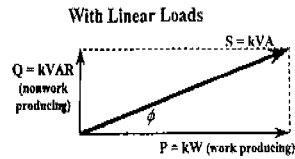
Z_h : 고조파 차수별 임피던스

T_h : 고조파 차수별 유도장해 가증계수

H : 5,000(Hz)

마. 역률 저하

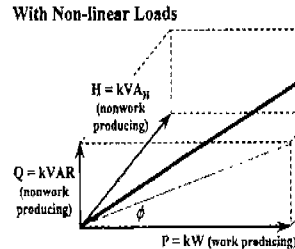
역률이라 하면 일반적으로 아래 위의 그림에서와 같이 전동기 등 리액턴스 성분만 고려하여 $PF = \cos \phi$ 라 하고 있지만 비선형 부하에서는 고조파 전압과 고조파 전류에 의한 왜곡전력도 무효분으로 아래 하단 그림에서와 같이 3차원적으로 해석해야 한다. 즉 리액턴스 성분에 의한 무효분이 작더라도 왜곡전력이 크면 무효분이 크게 되어 역률이 저하하게 된다.



$$pf = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} = \cos \phi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$kVA = \sqrt{kW^2 + kVAR^2}$$



$$pf = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} \neq \cos \phi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2}$$

$$kVA = \sqrt{kW^2 + kVAR^2 + kVA_H^2}$$

▶ 역률 실측 결과

다음은 경북 구미시 소재 전자공장에서 측정 한 Data로서 기본파 역률 (dPF: 인덕턴스로 인하여 발생하는 무효분)은 100%이나 고조파 전류가 83% 함유되어 있어 종합역률(PF)은 76%로 나타나고 있다.

전압	전류	유효전력	피상전력	무효전력	종합역률 (PF)	기본파 역률(dPF)	전압 왜형률	전류 왜형률
376.7V	214.9A	61.74kW	80.93kVA	6.33kVAr	76%	100%	3.9%	83%

```

L11          Oct 28 2008 (Fri)
METERS          11:56:56 AM

Voltage:          376.7 Urms
Phase R-B:       376.9 Urms
Phase B-C:       374.3 Urms
Phase C-A:       379.8 Urms
Unbalance:       0.7%

Current:         214.9 A rms
Phase R:         131.5 A rms
Phase B:         133.8 A rms
Phase C:         149.6 A rms
Unbalance:       15.5%

Power:           61.74 kW
Unit-Rmps:       88.93 kVAR
WR Reactive:     6.332 kVAR
Power Factor:    0.76 PF
Displacement Factor: 1.00 dPF

Voltage THD:     3.9% THD
A-Hm Volt:      4.0% THD
B-Hm Volt:      3.7% THD
C-Hm Volt:      4.0% THD

Current THD:    83.0% THD
A Current:      82.3% THD
B Current:      82.4% THD
C Current:      84.2% THD
    
```

▶ 고조파 저감시 역률개선

Non-Linear(비선형) 부하의 고조파 무효분(H)을 제거함으로써

- 역률 77%(고조파 제거전)를 99%(고조파 제거후)로 개선한 사례를 나타내었다.

⊙ 고조파 전류 개선전 실측자료

ALL CHANNELS SUMMARY REPORT f=60.03hz (A)					
	A	B	C	D	ABC
V	216.7	217.7	217.0	0.101	216.7
I	72.53	76.45	75.52	0.000	72.53
PF	0.776	0.781	0.776	0.000	0.766
Ithd	74.75	73.30	73.35		

⊙ 고조파 전류 개선후 실측자료

ALL CHANNELS SUMMARY REPORT f=60.03hz (A)					
	A	B	C	D	ABC
V	216.7	217.9	217.3	0.107	216.9
I	59.59	63.01	61.68	0.000	59.59
PF	0.998	0.988	0.984	0.000	0.988
Ithd	6.388	6.033	5.737		

바. 변압기 손실 증가

▶ 부하손실

변압기의 부하손실은 주파수와 관계없는 저항손과 주파수와 관계가 있는 도체중의 와전류손, 도체를 제외한 부분의 누설자속에 의한 표류손실로 이루어진다. 와전류손과 표류손은 서로 밀접한 관계가 있어 분리가 곤란하기 때문에 일반적으로 양자를 합하여 표류손실이라 말한다. 부하손실은 다음 식으로 나타낸다.

$$W = W_R + W_E (W_R: 저항손실 \quad W_E: 표류손실)$$

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 R (1 + \beta n^m)$$

▶ 무부하손실

계통 말단에 고조파 전류 발생원이 있으면 전압파형이 왜곡된다.

변압기 여자전압이 비정현파인 경우는 자속과 형태도 일그러져 무부하손실의 값이 변한다. 무부하 손실의 대부분은 규소강판에서 발생하는 철손이고, 철손은 히스테리시스손과 와전류손으로 이루어진다. 히스테리시스손은 주파수와 여자전압의 평균치와 함수관계에 있고, 와전류손은 여자전압 실효치의 2승에 비례하기 때문에 고조파가 증가하면 무부하손실은 증가한다.

사. 케이블 손실 증가

▶ 케이블 과열

- 교류도체저항 증가, 전류 증가⇒케이블 과열

$$\text{교류저항 } R_{AN} = R_D \times (1 + \lambda_S + \lambda_P)$$

R_D : 직류도체저항

λ_S : 표피효과계수

λ_P : 근접효과계수

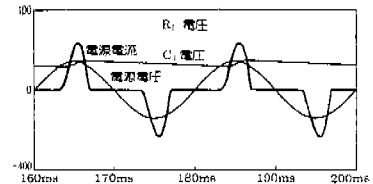
즉, 고조파에 의한 높은 주파수로 인하여 케이블의 교류저항은 증가하고, 송전용량은 감소한다.

$$\text{도체의 발열 (Watt)} = \Sigma (I_N^2 \times R_{AN})$$

아. 변압기 출력감소

변압기에 고조파가 함유되면 아래 그림과 같이 전류파형의 끝이 뾰족한 첨부파형의 형태로 되거나 과열 현상에 의하여 변압기 출력이 저하된다. 일반적으로 고조파 부하(비선형 부하) 전용 변압기인 경우는 변압기의 최대 이용 출력이 50-60% 정도로 저하된다.

(단상부하)



⊙ 변압기 출력감소를

$$THDF = \frac{\sqrt{2} I_{ture rms}}{I_{peak}}$$

※ THDF : Transformer Harmonics Derating Factor

(3상부하(ANSI/IEEE C57-110))

㉔ 변압기 출력 감소율

$$THDF = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{P_{LL}(pu)}} \times 100[\%]$$

- * $P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu)$
- * $P_{LL}(pu) = 1 + K\text{-Factor } P_{EC-R}(pu)$
- * P_{EC-R} : 와류손

㉕ K-Factor 13 인 경우 (Mold TR)

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

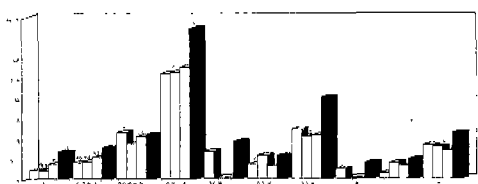
즉, 정격의 64%가 최대이용율임.

자. 발전기 출력저하

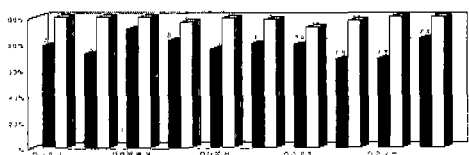
발전기의 댐퍼봉과 단락동판은 변류기의 2차 축 권선작용을 하기 때문에 발전기에 역상 전류가 흐르면 역상회전자계의 자속이 댐퍼권선 회로와 쇄교하여 댐퍼권선 등의 손실이 증가되고 출력을 저하시킨다.

7) 수용가별 중성선 과전류 현황

선저규 대 중성선전류 대비표



고조파에 의해 저감된 역률 비교표



100kVA 이상 변압기 부하 적용률(THDF 표)



3. 영상고조파전류 저감장치(ZED:Zero harmonic Eliminating Device)

1) 영상고조파전류 저감장치 원리

영상고조파전류 저감장치는 그림6과 같이 같은 철심에 2개의 권선을 반대 방향으로 감은 것으로 영상분 전류는 위상을 같게 하여 Cancel 되게 하였으며 정상, 역상분 전류는 벡터합성이 크게 되게 한 것이다. 즉, 영상임피던스는 작게 하여 영상분 전류를 ZED로 잘 흐르게 하고 정상 및 역상임피던스는 크게 하여 정상, 역상분 전류가 ZED로 흐르지 않게 한 것이다.

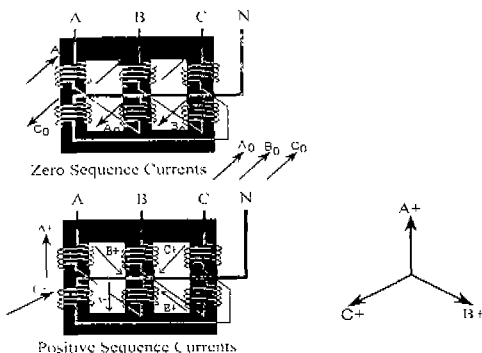


그림6 ZED 내부결선 및 벡터합성

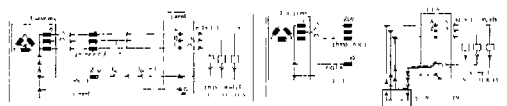


그림7 ZED 설치시 영상분 전류 흐름도

그림7은 ZED를 설치하지 않은 것과 설치한 것을 비교한 것이며 ZED를 설치하지 않았을 때는 중성선에 영상분 전류가 많이 흐르는데 비해 ZED를 설치하면 영상분 전류는 ZED로 흐르고 정상 및 역상분 전류만 중성선을 통하여 흐르게 된다.

2) 영상고조파전류 저감장치 설치 후 영상분 전류 개선사례

영상고조파 저감장치(ZED)를 현장 개선 설치하여 고조파를 저감하였으며, 다음 표4는 서울시 소재 빌딩에 설치하여 영상분 고조파전류를

개선한 사례를 소개해 본다.

표 4 영상고조파전류 저감장치(ZED) 설치효과

구 분	설치전	설치후	설치 효과
N상 전류	208A	25A	183A 감소
중성선대지전위	3V	0.25V	2.75V 감소
전압고조파	5.3%	4.9%	0.4% 감소
전류고조파	66.3%	31.7%	34.6% 감소
역률	80%	96%	16% 향상
피상전력	97.3kVA	80.8kVA	16.5kVA 감소
유효전력	77.9kW	75.7kW	2.2kW 감소
무효전력	57.6kVAr	18.8kVAr	38.8kVAr 감소

- 중성선(N상)에 흐르는 208A가 저감장치 설치 후 25A로 감소됨.
- 중성선에 잔여전류 25A는 각 상의 불평형 전류에 의한 것임.
- 중성선의 대지전위가 3V에서 0.25V로 감소됨.
- 역률상승 및 유효전력이 감소되어 에너지 절약효과가 있음.
- 변압기 소음 및 온도상승이 현저하게 줄어듦.
- MCCB 발열 및 케이블 중성선의 발열이 줄어듦.

표5는 서울시 소재 빌딩에 설치하여 영상분 고조파전류를 개선한 사례2를 소개해 본다.

표 5 영상고조파전류 저감장치(ZED) 설치효과

구 분	설치전	설치후	설치 효과
N상 전류	643.0A	310.8A	332.2A 감소
중성선대지전위	9.3V	3.5V	5.8V 감소
전압고조파	10.0%	3.4%	6.6% 감소
전류고조파	46.4%	25.2%	21.2% 감소
역률	97.5%	98.4%	0.9% 향상
피상전력	885.3kVA	867.3kVA	18.0kVA 감소
유효전력	878.7kW	859.7kW	19.0kW 감소
무효전력	107.9kVAr	114.6kVAr	6.7kVAr 감소

- 변압기 2차 중성선(N상)에 흐르는 전류를 332A를 감소시킴.
- 18F 분전반 중성선의 대지전위가 9.3V에서 3.5V로 감소됨.
- 콘덴서를 부착하지 않고 ZED만 설치하여 역률상승 및 유효전력이 감소되어 에너지 절약효과가 있음.
- 변압기 소음 및 온도상승이 현저하게 줄어듦.

- MCCB 발열 및 케이블 중성선의 발열이 줄어듦.

표6은 울산시 소재 공장에 설치하여 영상분 고조파전류를 개선한 사례를 소개해 본다.

표 6 영상고조파전류 저감장치(ZED) 설치효과

구 분	설치전	설치후	설치 효과
N상 전류	911.5A	851.4A	60.1A 감소
전압고조파	5.6%	2.7%	2.9% 감소
전류고조파	66.1%	57.2%	8.9% 감소
역률	96.9%	97.1%	0.2% 향상
피상전력	1086.9kVA	1077.6kVA	9.3kVA 감소
유효전력	1052.7kW	1046.4kW	6.3kW 감소
무효전력	270.5kVAr	257.4kVAr	13.1kVAr 감소

- 변압기 2차에 ZED 1대만을 설치하여 효과 분석한 자료이므로 ZED를 추가설치하면 효과는 증가될 것임.
- 변압기 2차 중성선(N상)에 흐르는 총전류를 60A를 감소시킴.
- 콘덴서를 부착하지 않고 ZED만 설치하여 역률상승 및 유효전력이 감소되어 에너지 절약효과가 있음.
- 변압기 소음 및 온도상승이 현저하게 줄어듦.
- MCCB 발열 및 케이블 중성선의 발열이 줄어듦.

<끝>

※ 고조파로 인한 원인모를 여러가지 장애에 대하여 궁금한 사항은 아래의 연락처로 문의하시면 성실히 답변하여 드리겠습니다.

◆ (주)피에스디테크

경기도 성남시 중원구 상대원1동 223-12 현대1밸리 304호
 TEL : 031-737-9290, FAX : 031-737-9298
 E-mail : psdtech@psdtech.com
 http://www.psdtech.co.kr

◆ 협회부설 전력기술연구원

서울시 관악구 봉천10동 32-8 동진빌딩
 TEL : 02-875-6524, FAX : 02-888-4473
 협회 홈페이지 : www.keea.or.kr