

배전계통에서 위상조정 변압기를 사용한 고조파 저감에 관한 연구

(A Study on the Harmonics Reduction using Phase Shifting Transformer
in a Electric Power Distribution System)

김경철*

(Kyung-Chul Kim)

요 약

전력변환기와 같은 비선형 부하의 사용증가는 전력시스템에 고조파를 발생시킨다. 고조파를 포함하는 전류와 전압은 전기설비에 고장과 오동작을 일으키게된다. 위상조정 변압기는 고조파 발생원이 병렬로 설치되어 있는 곳에 설치하면 고조파 문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 본 논문에서는 EDSA고조파 분석 프로그램을 사용하여 고조파를 제거하기 위한 위상조정 변압기의 효과를 분석하고 검증하였다.

Abstract

The increasing use of non-linear loads such as power electronics draw highly distorted currents from the utility system. High harmonics current, and voltages will cause equipment damage and disturb the plant operation. The application of phase shifting transformers can be a very cost-effective method of harmonic treatment where multiple harmonic sources are in operation. In this paper simulation results used the EDSA harmonics analysis program verifying the effects of a phase shifting transformer for harmonic elimination are presented.

Key Words : Phase Shift Transformer, Harmonic Elimination

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발달에 따라서 고조파로 인한 장애가 많이 발생하고 있다[1].

고조파란 전력분야에서 상용주파수(60[Hz])보다

높은 주파수를 뜻한다. 전압이나 전류의 파형은 정현 파인데, 비선형부하에 의하여 파형이 왜곡되어 비정현 주기파가 된다. 고조파는 상용주파수의 배수인 주파수를 포함하는 정현파 전압이나 전류를 말한다[2]. 고조파를 발생하는 전기설비로는 변압기, 전기로, 각종 전력변환장치 등이 있다. 고조파 장해로는 변압기나 각종 설비의 과열을 초래하고, 중성선 과열, 중성선과 접지간의 높은 전압유도, 역률저하, 고조파 동조 등을 초래한다[3].

본 논문에서는 고조파 저감대책의 일종으로 위상

* 주저자 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 0541-863-7605
E-mail : yangjier@wow.hongik.ac.kr
접수일자 : 2001년 11월 19일
1차심사 : 2001년 11월 21일
심사완료 : 2001년 12월 19일

조정 변압기를 사용한다. 고조파 발생원을 포함한 사례연구 배전시스템을 구성하여 EDSA고조파 해석 프로그램[4]을 사용하여 고조파 특성을 검토하고, 적절한 위상조정 변압기를 설치하여 고조파 저감효과를 검증하였다.

2. 위상조정 변압기의 고조파 저감 알고리즘

배전계통에서 위상조정 변압기 (Phase Shifting Transformer, PSTR)는 전압의 크기를 일정하게 유지하고, 위상만 조정하여 병렬부하의 고조파를 저감시키는데 사용된다. 위상조정 원리를 이해하기 위해 그림 1과 같은 위상조정 변압기의 결선도와 위상 벡터도를 살펴보자[5].

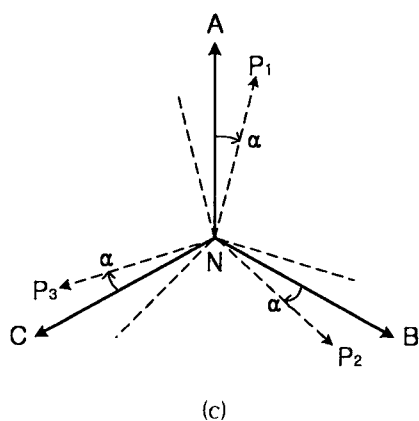
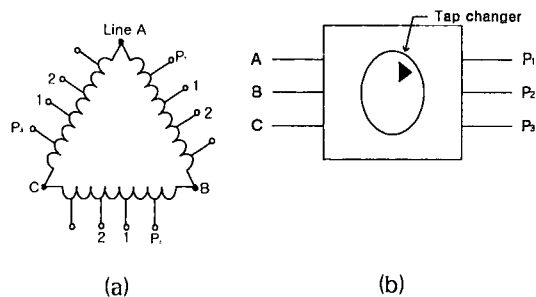


그림 1. 위상조정 변압기
Fig. 1. Phase-shift Transformer

3상 송전선로가 입력단자 A, B, C에 연결되어 있

다. 2차측의 P₁, P₂, P₃는 탭변환기에 의해 동시에 이동하여 전압의 크기는 변하지 않고 위상만 α[°]로 조정된다. 위상 조정은 최대 60[°]이고, 일반적으로 ±30[°]범위로 탭 변환기에 의해 단계적으로 조절할 수 있다.

위상 조정변압기가 고조파 발생원의 5, 7, 11고조파를 저감시키는 원리를 알아보자[6]. 먼저 기본파의 경우는 그림 2에서 벡터도를 통해 설명한다.

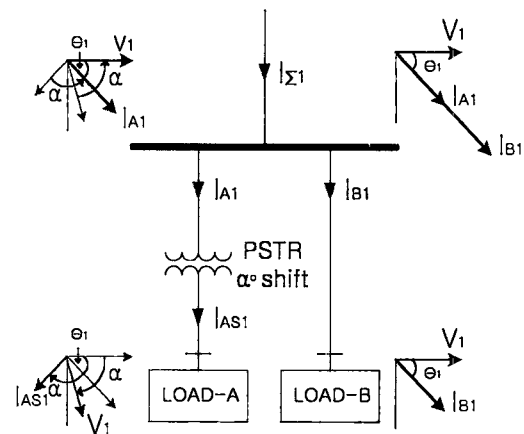


그림 2. 기본파의 전류벡터도
Fig. 2. Current Vector Diagram at Fundamental Frequency

기본파(60[Hz])에서는 전압 V₁[V]과 전류 I₁[A] 사이에 위상차 θ₁[°]가 있다고 가정한다. 부하 A의 2차측에서는 전압과 전류 모두 위상조정 변압기(α[°] 지상)에 의해 α[°]만큼 위상이 뒤서게 된다. PSTR 1차측은 α[°]만큼 위상이 보상되어 부하모선과 동위상이 된다. 따라서 부하모선에서는 전류 I_{A1}과 I_{B1}는 대수적 합으로 된다. 즉,

$$I_{\Sigma 1} = I_{A1} + I_{B1} \tag{1}$$

위상조정 변압기의 위상을 15[°]로 하면, 그림 3과 같이 11고조파가 저감된다. 기본파전압 V₁[V]과 11고조파 전류 I₁₁[A] 사이에 위상차 θ₁₁[°]가 있다고 가정한다. 부하 A의 2차측에서 전압은 1차측보다

15[°]뒤지고, 전류 I_{AS11} 는 15[°]×11=165[°]위상이 뒤져 흐른다. PSTR 1차측은 15[°]만큼 위상이 더해져서 전압은 부하모선의 전압과 동위상이고, 전류 I_{A11} [A]은 역상전류이므로 부하 B의 전류 I_{B11} [A]과 크기는 같고, 위상은 15[°]가 감해지면 180[°]차이가 나게 된다.

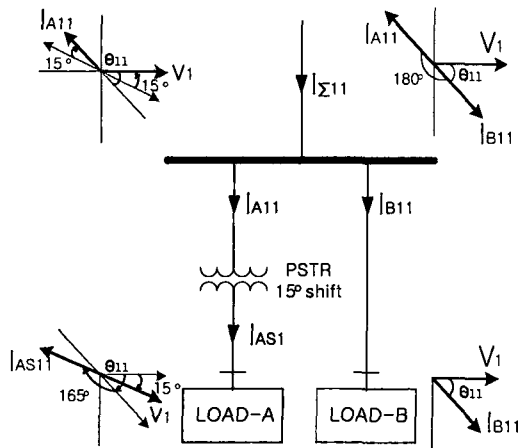


그림 3. 11고조파의 전류벡터도
Fig. 3. Current Vector Diagram at 11th Frequency

따라서 부하모선에 흘러 들어오는 11고조파 전류의 합 $I_{\Sigma 11}$ [A]은

$$I_{\Sigma 11} = I_{A11} + I_{B11} = 0 \quad (2)$$

이 되어 11고조파 전류는 제거된다. 같은 방법으로 13고조파 전류도 15[°]위상조정으로 제거할 수 있다.

위상조정 변압기의 위상을 30[°]로 하면, 그림 4과 같이 5, 7, 17, 19고조파가 저감된다. 기본파전압 V_1 [V]과 7고조파 전류 I_7 [A]사이의 위상차 θ_7 [°]가 있다고 가정한다. 부하 A의 2차측에서 전압은 1차측보다 30[°]뒤지고, 전류 I_{A57} 는 30[°]×7=210[°]위상이 뒤져 흐른다. PSTR 1차측은 30[°]만큼 위상이 더해져서 전압은 모선 13의 전압과 동위상이고 전류 I_{A7} [A]은 정상전류이므로 부하 B의 전류 I_{B7} [A]과 크기는 같고, 위상은 30[°]가 더해지면 180

[°]차이가 나게 된다. 따라서 부하모선에 들어오는 7고조파 전류의 합 $I_{\Sigma 7}$ [A]은

$$I_{\Sigma 7} = I_{A7} + I_{B7} = 0 \quad (3)$$

이 되어 7고조파 전류는 제거된다. 같은 방법으로 5, 17, 19고조파도 제거된다.

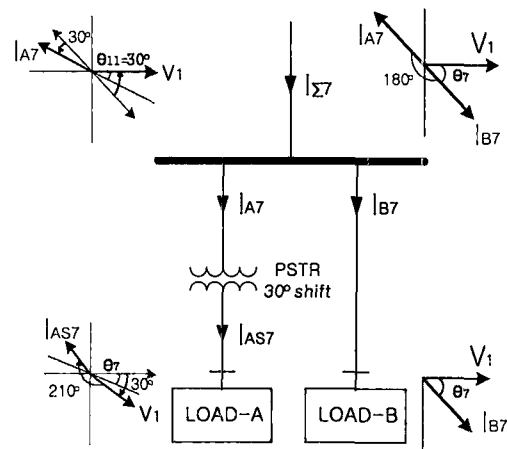


그림 4. 7고조의 전류벡터도
Fig. 4. Current Vector Diagram at 7th Frequency

3. 사례연구

배전계통에서 위상 조정변압기의 고조파 저감효과에 대해서 알아보기로 한다. 그림 5는 사례연구 배전 시스템의 계통도이다. 배전변전소는 공급전압 22.9

[kV], 단락용량이 150[MVA]이다. 주 변압기는 22.9[kV] 배전전압을 3.3[kV]으로 낮추고, 용량은 10[MVA]이며, 두 개의 주 모선에 전력을 공급하고 있다. 모선번호 1에는 두 대의 전동기(3000[HP]와 1500[HP])부하와 780[kVAR]의 역률개선용 캐패시터뱅크가 있다. 배전 변압기는 용량 2[MVA]이고, 3.3[kV]전압을 380[V]로 낮추어 고조파 발생원을 포함하는 부하에 전력을 공급하고 있다. 모선번호 2에는 500[HP]전동기 부하와 용량 300[kVAR], 역률 75[%]인 두 대의 가변주파수 교류구동장치(Variable Frequency AC Drives, VFD)으로 구성되어 있다. VFD에서 발생하는 고조파를 저감하기 위해 위상조

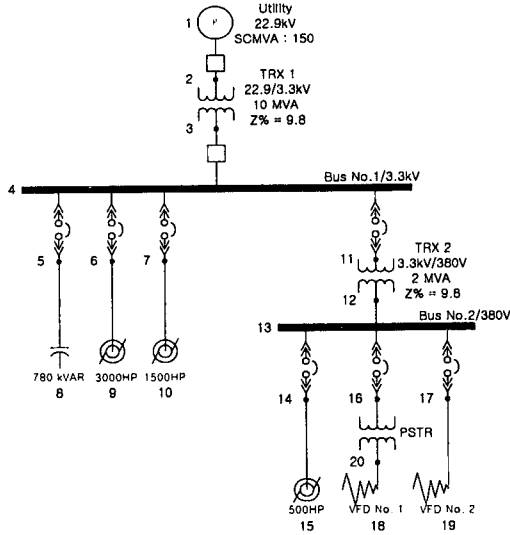


그림 5. 사례연구 배전 시스템
Fig. 5. Single-line Diagram of the Distribution System Under Study

정 변압기(용량 500[kVAR], 380[V]/380[V], 5.7[%]임피던스)를 선로에 설치하였다.

모선 18과 모선 19에 고조파 발생원으로 VFD가 설치되어 있다. 그림 6은 VFD의 전류파형과 고조파 성분이다. 전류 왜형률은 31.5[%]이고, 주로 5(28.83[%]), 7(8.76[%]), 11(6.73[%])고조파로 이루어져 있다. 전력계통에서 고조파 문제의 판단기준은 왜형률로 나타낸다. 즉, 전압과 전류 왜형률(Total Harmonic Distortion, THD)은 다음과 같다[7].

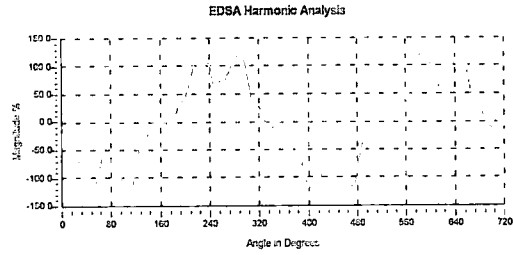
전압 왜형률

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (4)$$

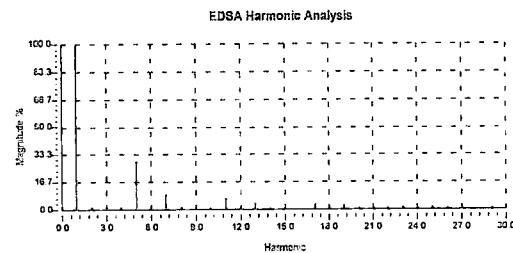
전류 왜형률

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (5)$$

여기서 첨자 1은 기본파, 2,3,...,n은 고조파 차수를 의미한다.



(a)



(b)

그림 6. VFD 전류 파형
Fig. 6. VFD Current waveform

그림 7은 모선 4의 주파수 응답 곡선이다. 부하 모선 13도 거의 같은 11고조파 부근에서 임피던스 공진을 나타내고 있다. 즉, 고조파 발생원에 11고조파 성분이 있다면, 병렬공진을 일으켜 고조파 장애가 증폭되어지게 된다.

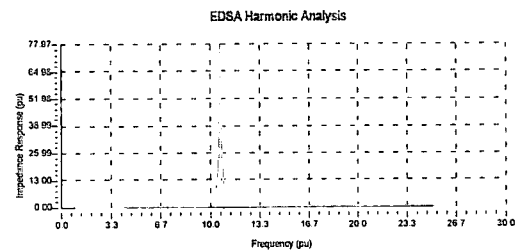


그림 7. 모선 4의 주파수 응답곡선
Fig. 7. Frequency Response at Bus 4

EDSA고조파 분석 프로그램을 이용한 결과를 표와 그림으로 요약하면 다음과 같다. 표 1은 주요 모선의 전압 왜형률을 비교한 결과이고, 표 2는 주요 선로의 전류 왜형률을 비교한 결과표이다. 위상조정 변압기의 위상이 0[°], 15[°], 30[°]일때를 비교하

배전계통에서 위상조정 변압기를 사용한 고조파 저감에 관한 연구

여 위상조정 변압기의 고조파 저감효과를 알아보았다.

표 1. 모선 전압 왜형률
Table 1. THD for Bus Voltages

Bus ID	0[°] shift		15[°] shift		30[°] shift	
	V _{rms} [V]	THD [%]	V _{rms} [V]	THD [%]	V _{rms} [V]	THD [%]
1	22910	2.89	22900	0.38	22909	2.84
4	3224	7.35	3215	0.97	3223	7.22
13	361	6.95	361	3.07	361	5.54

표 2. 선로 전류 왜형률
Table 2. THD for Line currents

Bus ID		0[°] shift		15[°] shift		30[°] shift	
From	To	I _{rms} [V]	THD [%]	I _{rms} [V]	THD [%]	I _{rms} [V]	THD [%]
1	2	130.63	8.06	130.24	2.04	130.58	7.52
5	8	171.37	81.31	133.23	6.38	170.97	80.84
14	15	813.24	4.73	812.66	2.82	812.60	2.57
11	12	199.96	15.24 (K=2.01)	198.70	10.17 (K=1.37)	197.95	5.33 (K=1.40)
12	13	1736.46	15.24	1725.51	10.17	1719.06	5.33

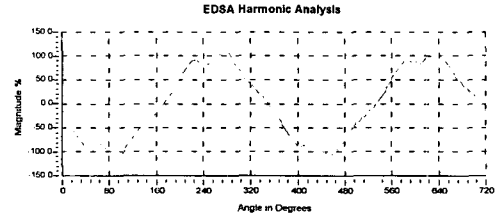
[주] K는 변압기의 K-factor로 다음 식으로 정의된다.

$$K - \text{factor} = \frac{\sum (h^2 I_h^2)}{\sum I_h^2}$$

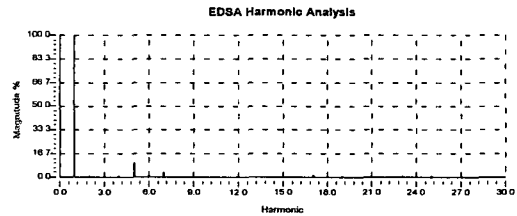
여기서 h는 고조파 차수이다. K-factor는 변압기에서 고조파 전류를 얼마만큼 허용할 수 있는지를 나타내는 계수로 값이 클수록 고조파에 견디도록 설계된 변압기이다.

위상조정 변압기를 15[°]로 하면 11, 13고조파가 저감되는 효과를 그림 8에서 알 수 있다. 그림 8은 15[°] 위상 조정시 선로 #12-#13의 전류파형을 나타내는데, 11, 13고조파가 제거된 것을 알 수 있다. 결과로 전류 왜형률은 15.24 [%]에서 10.17 [%]로 저감되었으나 고조파 전류원인 VFD에 포함된 5, 7고조파 성분이 여전히 남아 있어 큰 저감효과는 없었다. 부하모선 13의 전압 왜형률은 6.95 [%]에서 3.07 [%]로 낮아졌다. 주모선 4의 전압 왜형률은 7.35 [%]에서 0.97[%]로 저감되었다. 그림 9는 15[°] 위상 조정

시 선로 #5-#8의 전류파형을 나타내는데, 전류 왜형률이 81.31[%]에서 6.38[%]로 대폭 감쇄되었다.

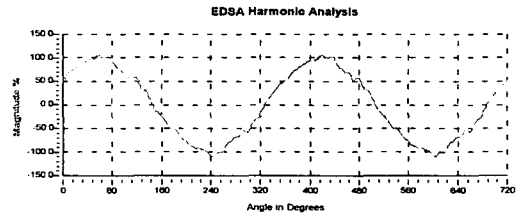


(a)

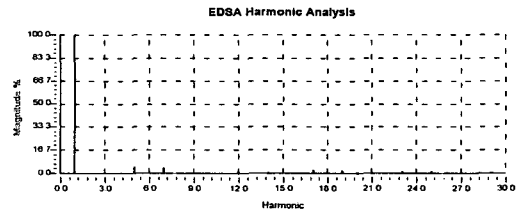


(b)

그림 8. 15[°] 위상조정시 선로 #12-#13의 전류 파형
Fig. 8. Line current waveform from Line #12 to Line #13 with 15[°] Phase-shift



(a)



(b)

그림 9. 15[°] 위상조정시 선로 #5-#8의 전류 파형
Fig. 9. Line current waveform from Line #5 to Line #8 with 15[°] Phase-shift

위상조정 변압기를 30[°]으로 하면 5, 7, 11, 13고조파가 저감되는 효과를 그림 10에서 알 수 있다. 그림 10은 30[°]위상 조정시 선로 #12-#13의 전류파형을 나타내는데, 5, 7고조파가 제거 된 것을 알 수 있다. 결과로 전류 왜형률은 15.24[%]에서 5.33[%]으로 감소되었다.

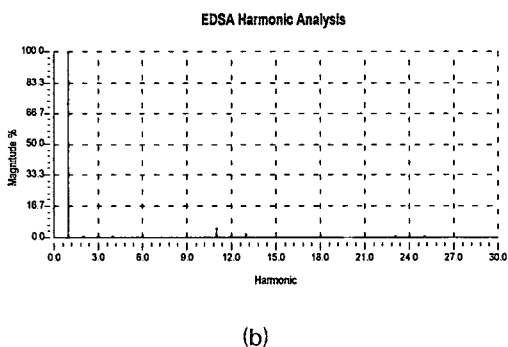
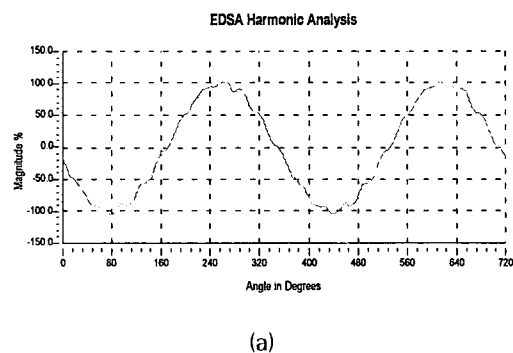


그림 10. 30[°] 위상조정시 선로 #12-#13의 전류파형
Fig. 10. Line current waveform from Line #12 to Line #13 with 30[°] Phase-shift

그림 11은 15[°]위상 조정시 선로 #5-#8의 전류파형을 나타내는데, 전류 왜형률이 81.31[%]에서 80.84[%]로 변화가 거의 나타나지 않았다. 이유는 배전시스템의 공진 주파수가 11고조파이기 때문에 부하의 11고조파 발생원으로 인한 병렬공진으로 증폭되었기 때문이다. 부하모선 13의 전압 왜형률은 6.95[%]에서 5.54[%]로 낮아졌다. 주모선 4의 전압 왜형률은 7.35[%]에서 7.22[%]로 크게 변동이 없었다. 그러므로 배전시스템의 공진 주파수와 일치하는 부하의 고조파 발생원이 있으면 저감효과가 없고, 오히려 나빠지는 결과를 초래한다.

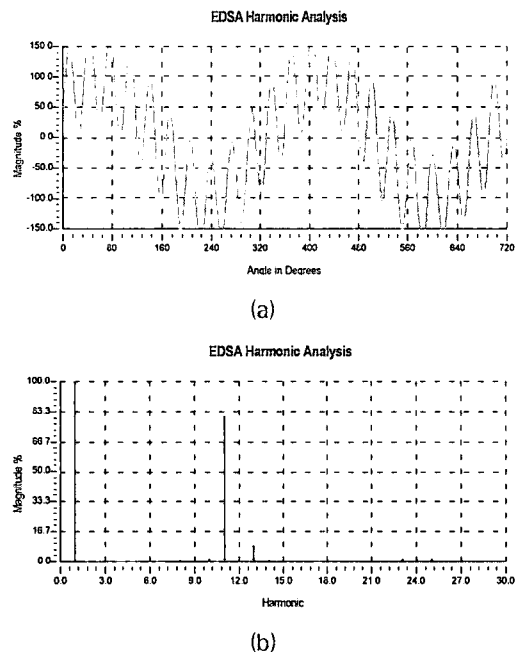


그림 11. 30[°] 위상조정시 선로 #5-#8의 전류 파형
Fig. 11. Line current waveform from Line #5 to Line #8 with 30[°] Phase-shift

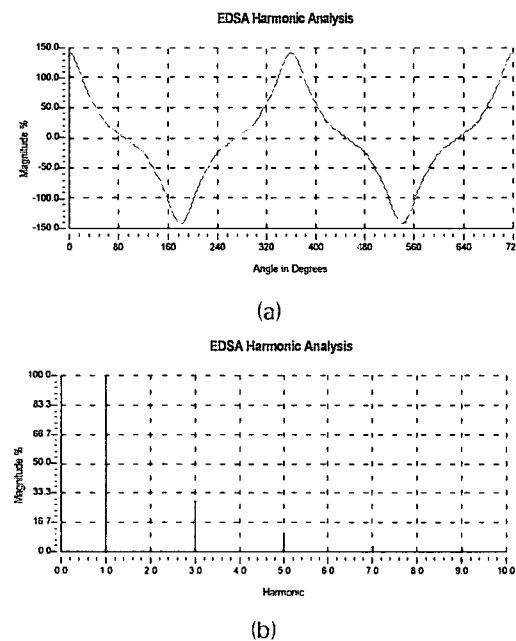


그림 12. 아크로의 전류 파형
Fig. 12. Current Waveform of Arc Furnace

위상조정 변압기는 고조파 발생원의 부하가 병렬로 연결되고, 같은 종류일 때 고조파 저감효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 만일 부하모선 19에 VFD-2 대신에 용량 300[kVA], 역률 75[%]인 아크로가 있다고 하자. 그림 14는 아크로의 전류 파형이다. 고조파로 3(29.0[%]), 5(7.9[%]), 7(3.1[%]), 9(2.0[%]) 고조파로 구성되어 있다.

고조파 분석결과 표 4과 표 5에서 다른 종류의 부하가 있을 때는 위상조정 변압기가 역효과가 있을 수도 있다는 것을 나타낸다. 전압 및 전류 왜형률이 오히려 나빠지는 경우이다. 그러므로 위상조정 변압기를 고조파 제거 장치로 사용하려면 부하의 종류와 배전시스템의 공진 상태 등을 고려해야 한다.

표 4. 다른 부하시 모선 전압 왜형률
Table 4. THD for Bus Voltages at Different Load

Bus ID	0° shift		30° shift	
	V _{rms} [V]	THD[%]	V _{rms} [V]	THD[%]
1	22902	1.44	22902	1.47
4	3217	3.66	3217	3.73
13	361	3.37	361	4.01

표 5. 다른 부하시 선로 전류 왜형률
Table 5. THD for Line currents at Different Load

Bus ID	0° shift		30° shift		
	I _{rms} [V]	THD[%]	I _{rms} [V]	THD[%]	
From 1	To 2	130.32	4.08	130.33	4.36
5	8	143.50	40.59	143.62	40.83
14	15	812.63	2.68	812.80	3.40
11	12	198.51	9.19 (K=1.23)	199.04	11.80 (K=1.38)
12	13	1723.89	9.19	1728.53	11.80

4. 결론

배전계통에서 비선형부하는 많은 고조파 문제를 일으키고 있다. 고조파 발생원의 종류와 전력시스템의 구성에 따라 고조파 문제를 해결하는 것이 효과적이다.

본 논문에서는 위상조정 변압기의 고조파 제거 원리를 설명하고, 사례연구 배전시스템에 적용하여 효과를 알아보았다. 위상을 15°로 하면 11, 13고조파가 저감된다. 위상을 30°로 설정하던 5, 7, 17, 19 고조파가 저감되는 것을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인할 수 있었다.

위상변압기는 고조파발생원이 같거나 비슷한 비선형 부하가 병렬로 연결되었을 때 효과가 가장 크게 나타났다. 부하 크기가 다를 경우는 고조파 저감효과가 줄어들게 된다. 만일 다른 차수의 고조파 발생원이 부하와 병렬연결 된 경우는 위상변압기의 고조파 제거효과가 거의 없고 때로는 악영향을 끼칠 수 있음을 사례연구를 통해 알아보았다.

고조파 제거시 유의할 점으로는 고조파 발생원이 포함된 전력시스템의 공진 고조파와 동조를 일으키지 않도록 해야 하는 것이다. 사례연구 배전시스템의 경우는 제 11고조파가 공진이 되므로 위상조정 변압기로는 15°로 하여 부하의 제 11고조파를 제거시켜 배전계통의 전압과 전류 왜형률이 만족할 만큼 저감된 결과를 확인하였다.

References

- (1) "전력계통의 고조파 장애 분석", 한국전기안전공사, 1996.
- (2) R.C.Dugan, M.F.McGranaghan, and H.W.Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill Co, 1995.
- (3) "고조파 저감기술 현황과 전망", 대한전기학회, 기술조사보고서 제7호, 1993.
- (4) EDSA user's Guide, "Electrical Power Systems Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co., 2000.
- (5) T.Wili, "Electrical Machines, Drives, and Power Systems", Prentice Hall Inc., 1991.
- (6) M.Levin, "Power System Harmonics Cause, Effect and Solution", Mirus International Inc., 2000.
- (7) "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics control in Electrical Power Systems", IEEE Std 519-1992.

◇ 저자소개 ◇

김 경 철 (金慶哲)
1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수.