

유도전동기의 고조파 저감장치 성능 비교 분석

박양범* · 김두현†

*청주기능대학 전기과 · 충북대학교 안전공학과
(2005. 4. 25. 접수 / 2005. 8. 20. 채택)

Analysing and comparing efficiency of harmonic reduction equipment for Induction Motor

Yang-Bim Park* · Doo-Hyun Kim†

*Department of Electrical Engineering, Cheongju Polytechnic College
†Department of Safety Engineering, Chungbuk National University
(Received April 25, 2005 / Accepted August 20, 2005)

Abstract : Recently, power conversion equipment increased rapidly makes a lot of harmonics. Thus, it is growing that wrong operation and break down of sensitive devices. There are two kinds of causes of harmonics. One of them is lots of power conversion equipment as modern controller, inverter, converter and SMPS(Switching Mode Power Supply). Another is nonlinear operating machines as transformer and motor. The more nonlinear loads like them grow, the more serious problems as harmonic current to source and low power factor because of increasing reactive power grow. It is installed for reactor and L-C Filter to decrease harmonic in general. This paper analysis and compares two of characteristics and harmonic from reactor and L-C Filter with operation of induction motor and power conversion equipment. In the result, L-C Filter more improves unbalance rate and THD than reactor.

Key Words : power conversion equipment, total harmonic distortion, induction motor

1. 서 론

전력전자 응용기기에 정현파 전압을 공급하면 부하기에 흐르는 전류파형은 비정현파가 되며, 이 파형은 기본파에 동조하여 주기적으로 연속된다. 또한 비정현파는 정현파 공급전압과 같은 주파수 성분에 정수배의 주파수 성분을 합성한 파형으로 나타낼 수 있으며, 기본파에 대해서 두배 이상의 정수배 주파수를 총칭하여 고조파(harmonics)라 한다¹⁻³⁾. 이와 같은 고조파 발생요인은 크게 두 가지 구분할 수 있는데 그 하나는 산업의 정보화에 따른 첨단 제어장치, 전력전자(power electronics)기기 등 다양한 반도체 전력변환 설비에 의한 것이며 다른 하나는 변압기, 회전기 등 기존 전력기기의 비선형 특성영역에서의 운전으로 인한 것을 들 수 있다^{4,5)}. 이러한 비선형부하(nonlinear load)의 사용이 증가하

면, 전원측에 많은 고조파 전류가 흐르게 되고 전압의 왜형 및 무효전력의 증가로 인한 역률이 저하되는 등 심각한 문제를 야기 시키고 있으며 유도전동기는 직류전동기에 비해 구조가 간단하고, 저가이며, 유지 보수의 측면이 매우 유리하다. 그러나 유도전동기의 가변속 운전을 위해서는 전력변환장치(inverter)와 같은 구동장치가 필요하다. 이와 같은 전력변환장치는 반도체소자의 스위칭(switching)작용으로 PWM(Pulse Width Modulation)을 수행하여야 하므로 전력변환장치의 출력에 많은 고조파가 함유될 수밖에 없다. 또한 고조파 성분은 전동기 운전 특성에 좋지 않은 영향을 미치므로 반드시 저감되어야 한다. 최근 고조파 저감을 위해 많이 사용되고 있는 장치로서는 수동필터(passive filter), 능동필터(active filter) 등이 있으며, 수동필터에는 리액터(reactor)와 L-C Filter가 주로 사용되고 있다⁶⁻⁹⁾. 리액터와 L-C Filter는 구조가 간단하며, 고압 및 저압에 적용이 용이하며, 특히 리액터는 가격이 저렴하

* To whom correspondence should be addressed.
dhk@chungbuk.ac.kr

고 설치가 용이하여 고조파 저감장치로 널리 사용되고 있다. 또한 능동필터는 성능은 좋으나 가격이 비싸고 유지관리가 어려우며, 에너지 절감효과는 거의 없다^{10,11)}. 따라서 본 연구에서는 고조파 저감장치로 현장 접근성이 제일 높은 리액터와 L-C Filter를 이용하여 전동기 및 전력변환장치 병렬운전에 따른 전원계통의 전기적 특성을 실험 하였으며, 삼상 불평형률 및 고조파 총왜형률(THD: Total Harmonic Distortion)등을 측정하여 고조파 발생에 따른 저감장치의 성능 및 저감효과를 비교 분석하였다.

2. 고조파 저감장치 적용

비선형 전력전자 기기의 사용증가로 인한 고조파 억제용 저감장치로는 수동필터로서 리액터와 L-C Filter가 주로 사용되고 있다. 리액터는 그 목적에 따라 전력변환장치의 입력용과 출력용으로 나눌 수 있는데 입력용으로 리액터를 설치하는 경우는 전원협조 및 역률개선을 목적으로 하며, 출력용에 설치하는 경우는 전동기의 기계적인 소음저감을 목적으로 한다. 또한 L-C Filter의 경우는 특정 또는 다수의 고조파 전류·전압을 제거하는데 사용되고 있으며¹²⁻¹⁴⁾, 특정 고조파의 전력계통으로 유출하려는 것을 방지하기 위해서는 관련 고조파 성분보다 낮은 임피던스 값을 갖는 L-C Filter가 사용되고 있다¹⁵⁾. 이와 같이 고조파 저감장치는 고조파를 발생하는 부하와 직렬로 접속하여 고조파 전류를 억제 하면서 전원계통에 나타나는 고조파 전압을 제한하기 위해서 사용되고 있다. 따라서 고조파 저감장치의 현장 적용은 부하기기 및 전력변환장치 특성을 고려하여 Fig. 1과 같이 리액터는 부하별 저압기에 고조파 발생원에 해당되는 전력변환장치 전원측에 부하별 적용을 고려 할 수 있으나, L-C Filter의 경우 부하변동 및 경제성을 감안하여 부하별 설치보다는 전원측(고압용)에 일괄 설치하는 경우가 많다^{16,17)}. 따라서 본 논문에서는 유도전동기 속도제어를 목

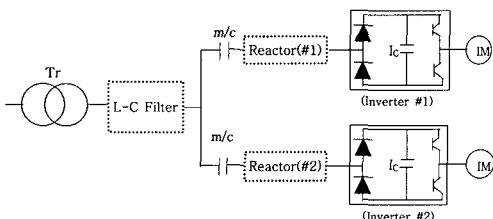


Fig. 1. Connection circuit of harmonic reduction equipment.

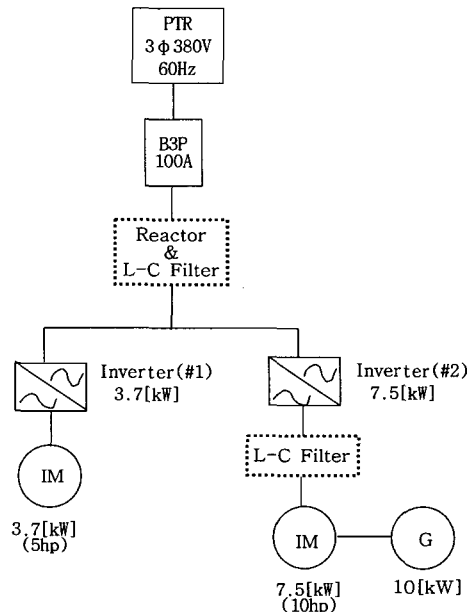


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

적으로 사용되고 있는 전력변환장치의 전원측에 저압용 리액터와 L-C Filter를 각각 사용하여 실험하였다. 그리고 전동발전기(M-G set) 운전에 따른 전원특성 및 고조파 저감효과를 실험하기 위하여 전동발전기 전원측에 L-C Filter를 적용하여 비교 분석 하였다.

3. 실험장치 및 방법

고조파 저감장치의 효과를 실험하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성 하였으며 실험에 사용된 기기는 삼상 전력용변압기와 고조파 저감장치로서 현장 활용 빈도가 높은 리액터 3[mH]20[A], 6[mH]20[A]와 L-C Filter 480[V], 31[A](MTE社)를 사용 하였다. 또한 전동기 속도제어를 위한 전력변환장치 3.7[kW] (fusi, #1)와 7.5[kW](denfos, #2) 그리고 전력변환장치 부하측에는 유도전동기 3.7[kW]와 7.5[kW]를 각각 사용하여 실험하였다. 또한 전력변환장치(#2)에는 발전기 10[kW]를 연결하여 전동기 부하로 이용 하였으며, 고조파 저감장치는 전력변환장치 및 전동기 병렬운전에 의한 고조파 성분의 저감효과를 실험하기 위하여 전원측에 설치하였다. 실험방법으로는 리액터 및 L-C Filter를 설치하지 않은 상태에서 삼상전압 및 불평형률과 같은 전기적특성과 고조파 총왜형률을 측정하였으며, 리액터 3[mH]와 6[mH]

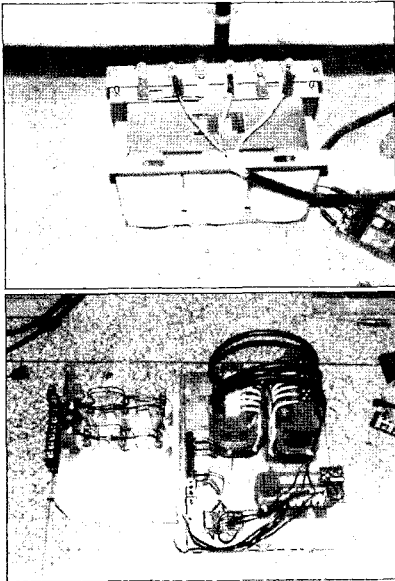


Fig. 3. Photograph of the experimental apparatus(Reactor & L-C Filter).

그리고 L-C Filter를 각각 적용하여 전원계통의 전기적특성 변화와 차수별 고조파 발생량 및 고조파 총 왜형률을 측정 하였다. 또한 전력변환장치(2#)의 부하측 고조파 발생량을 측정하기 위하여 L-C Filter를 설치하여 필터설치 전·후의 고조파 저감효과를 비교하였다. Fig. 3은 본 실험을 위하여 사용된 리액터 6[mH]20[A]와 L-C Filter를 나타낸 그림이다.

Table 1. Measurement of electrical characteristics of the induction motor with the reactor & L-C filter

Item	Content	without harmonics filter	with harmonics filter		
			Reactor		L-C filter
			3[mH]20[A]	6[mH]20[A]	
3Φ Average	Voltage[V]	372.9	359.1	361.4	372.5
	Current[A]	19.07	17.17	17.86	12.08
Unbalance	Voltage[%]	0.7	0.9	0.6	1.0
	Current[%]	5.2	4.1	3.8	2.0
3Φ Average	Power[kW]	9.92	9.91	9.93	10.06
	PF	0.71	0.94	0.89	0.85
THD	V _{THD} [%]	5.1	2.4	1.9	1.7
	I _{THD} [%]	87.2	29.3	21.2	13.2
Harmonics	3rd[%]	6.2	3.1	2.8	2.5
	5th[%]	72.1	35.8	21.7	10.5
	7th[%]	45.6	12.8	11.7	6.2
	9th[%]	23.8	7.8	6.9	5.7
	11th[%]	1.9	1.1	0.9	0.2

4. 결과 및 고찰

4.1. 전원측 고조파 저감장치 효과

전동기 및 전력변환장치를 연결한 상태에서 고조파 저감장치의 저감효과를 측정하기 위하여 저감장치 설치전 측정결과와 수동형필터에 속하는 리액터 3[mH]와 6[mH], L-C Filter를 각각 설치하였을 경우의 전기적특성 및 고조파 발생량에 따른 총왜형률의 측정결과 Table 1과 같았다.

Table 1에서 보는 바와 같이 삼상전압, 전류의 변화는 고조파저감장치 설치전에는 372.9[V], 19.07[A]로서 일반적인 전동기 운전에 따른 전압, 전류값을 유지 하였으나, 리액터 3[mH]20[A] 설치후에는 359.1[V], 17.17[A]로서 전압, 전류는 감소하는 것을 알 수 있었으며, L-C Filter 설치후 전압, 전류는 372.5[V], 12.08[A]로 나타났다. 이와 같이 리액터 설치시에는 전원측 전압강하가 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있었으며, L-C Filter 설치후 삼상전압은 캐패시터에 의한 전압보상에 따라 전압상승이 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 고조파 저감장치 설치 여부에 따른 삼상전압 변화를 나타내고 있으며, 같은 조건하에서 Fig. 5는 삼상전류의 변화를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 6은 전원측의 삼상평균 전압, 전류불평형률의 변화를 나타낸 것으로 전압보다는 전동기 부하에 따른 전류불평형률 변화가 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 전류불평형률의 경우 고조파 저감장치 설치전에는 5.2[%], 리액터 설치후에는 3.8[%], L-C Filter 설치후에는 2.0[%]로서 고조파 저감장치중에서 L-C Filter 설치후에 삼상 불평형률은 낮아졌음을 알 수 있었다.

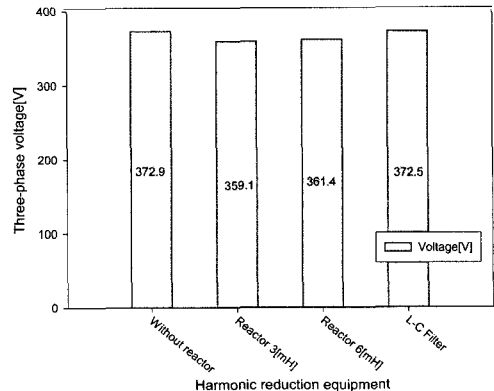


Fig. 4. Plots of three-phase voltage versus harmonic reduction equipment.

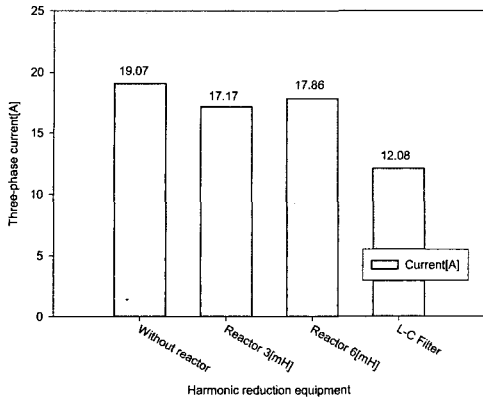


Fig. 5. Plots of three-phase current versus harmonic reduction equipment.

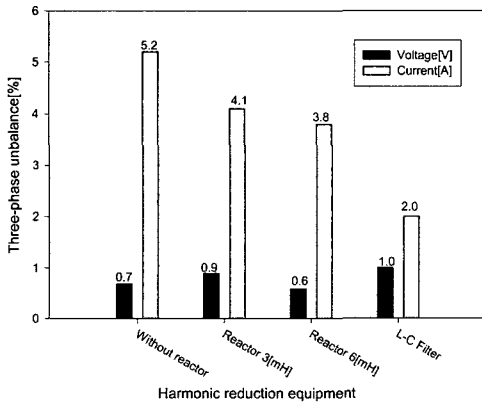


Fig. 6. Plots of three phase unbalance rate versus harmonic reduction equipment.

Table 1에서 고조파 저감장치 설치전의 역률은 0.71로서 저역률이었으나 리액터 3[mH]20[A] 설치 후에 0.94로 개선된 것을 확인 할 수 있었으며, L-C Filter 설치후에 역률은 0.85로 리액터 설치시 보다는 낮아졌으나 고조파 저감장치 설치전보다는 역률보상이 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 삼상 평균전력은 고조파 저감장치 설치전에 9.92[kW]였으나 리액터 설치후에는 약간 증가하는 것을 관찰하였으며, L-C Filter 설치후 평균전력은 10.06[kW]로 증가 하였다. 이와 같은 평균전력의 변화는 고조파 저감장치 자체에서의 전력소모에 의한 것으로 사료된다. 또한 삼상전압, 전류에 관한 고조파 총왜형률(Thd)의 변화는 Fig. 7에서와 같이 전압 고조파 총왜형률은 고조파 저감장치 설치전에 5.1[%]로 나타났으나 리액터 3[mH]20[A] 설치후에는 2.4[%], 6[mH]20[A]설치시는 1.9[%], L-C Filter 설치후에는

1.7[%]로 각각 감소 되었음을 알 수 있었다. 또한 전류고조파 총왜형률은 저감장치 설치전에 87.2[%]로 매우 높게 나타났으나 리액터 3[mH]20[A] 설치 후에는 29.3[%]로 크게 감소하였다. 그리고 리액터 6[mH]20[A] 설치시는 21.2[%], L-C Filter 설치시는 13.2[%]까지 감소하였음을 관찰하였다.

Fig. 8은 전동기 및 전력변환장치 운전에 따른 차수별(3rd, 5th, 7th, 9th, 11th) 고조파 발생량을 나타낸 그림으로 고조파 저감장치 설치전 고조파 총발생량은 149.6[%]로 나타났으며, 리액터 3[mH] 설치후에는 60.6[%], 6[mH] 설치시에는 44.0[%]를 나타내고 있다 또한 L-C Filter 설치후에는 25.1[%]로 매우 낮은 고조파 발생률을 보여주고 있다. 따라서 전원측에서 측정한 차수별 고조파 발생량은 L-C Filter설치시에 저감효과가 제일 높은 것을 알 수 있었다.

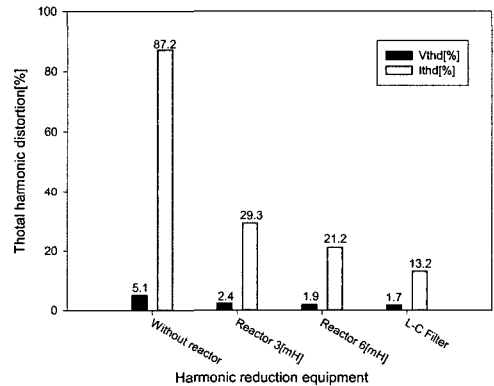


Fig. 7. Plots of total harmonic distortion versus harmonic reduction equipment.

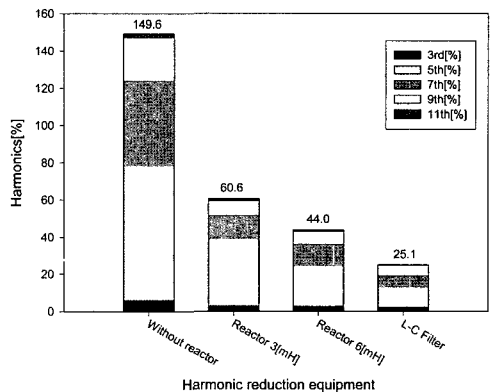


Fig. 8. Plots of harmonics versus harmonic reduction equipment.

4.2. 전력변환장치(#2)에서의 고조파 저감장치(L-C Filter) 효과

삼상유도전동기 10[hp], 7.5[kW]의 속도제어(speed control)를 위하여 설치한 전력변환장치(inverter #2 7.5kW)의 고조파 저감장치 효과를 실험하기 위하여 L-C Filter를 전력변환장치 부하측과 전동발전기(M-G set) 전단에 설치후 실험결과를 Table 2에 보여주고 있다. 고조파 저감장치 설치전의 삼상 평균 전압, 전류는 378.5[V], 8.72[A], L-C Filter설치 후에는 367.2[V], 7.46[A]로서 각각 감소 하였으며, 평균전력도 3.312[kW]에서 3.087[kW]로 고조파 저감장치 설치 후에 감소하였다. 또한 전압고조파 총왜형률(V_{THD})은 6.7[%]에서 4.1[%], 전류고조파 총왜형률(I_{THD})은 17.3[%]에서 6.9[%]로 L-C Filter 설치 후에 각각 감소하였음을 확인 할 수 있었다. Fig. 9는 L-C Filter 설치 전·후의 전압, 전류 고조파 총

Table 2. Measurement of electrical characteristics of the induction motor with the L-C filter

Item	Content	without harmonic filter	with L-C filter
3Φ Average	Voltage[V]	378.5	367.2
	Current[A]	8.72	7.46
Unbalance	Voltage[%]	0.1	0.5
	Current[%]	4.8	0.9
3Φ Average	Power[kW]	3.312	3.087
	PF	0.63	0.69
THD	V_{THD} [%]	6.7	4.1
	I_{THD} [%]	17.3	6.9
Harmonics	3rd[%]	0.9	1.1
	5th[%]	16.9	8.2
	7th[%]	3.8	1.5
	9th[%]	1.3	0.9
	11th[%]	0.2	0.5

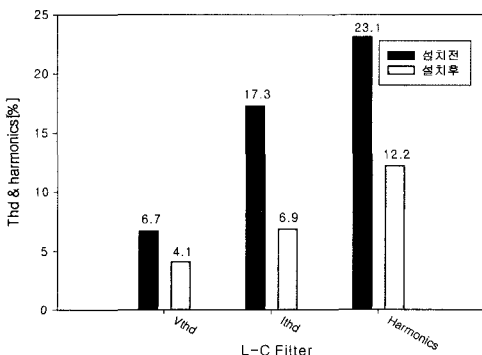


Fig. 9. Plots of thd & harmonics versus L-C Filter.

왜형률(Thd)과 차수별 고조파 총발생량을 보여주고 있다. 차수별 고조파 발생량은 필터 설치전에 23.1 [%]를 나타냈으나 필터 설치후에는 12.2[%]로 감소 하였음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 유도전동기 속도제어에 주로 사용되는 전력변환장치에서 발생하는 고조파량을 측정하였으며, 고조파 저감장치 효과를 실험하기 하기 위하여 리액터와 L-C Filter를 적용하여 고조파 발생에 따른 전기적 특성과 고조파 총왜형률(Thd)을 측정하고 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고조파 저감장치 설치전의 평균전압, 전류는 372.9[V], 19.07[A]이며, 리액터 6[mH]20[A] 설치시는 361.4[V], 17.86[A],로서 감소하였으나 L-C Filter 설치시에 전압은 372.5[V]로서 전압강하는 발생하지 않았다.

2) 리액터와 L-C Filter의 고조파 저감장치에 따른 저감효과를 비교하여 보면 전압총왜형률(V_{THD})은 1.7 [%] 전류총왜형률(I_{THD})은 13.2[%]로 리액터 설치시 보다 저감장치 효과가 높은 것을 알 수 있었다. 또한 리액터 저감장치는 L[mH]값이 클수록 전류총왜형률(I_{THD}) 저감효과는 양호하게 나타났으며, 차수별 고조파 발생량도 리액터 보다는 L-C Filter의 고조파 저감효과가 높은것을 알 수 있었다.

3) 전력변환장치(#2) 부하측에 L-C Filter를 설치 후에 전압, 전류총고조파 왜형률은 크게 감소하였으나, 평균전력은 다소 증가하는 것으로 보아 고조파 저감장치내에서 전력소모가 있었음을 확인하였다.

감사의 글 : 이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) "Nonlinear Load Mean Trouble", EC & M, Mar., pp. 83~90, 1988.
- 2) J. Reeve and P. C. S. Krishnayya, "Unusual current harmonics arising from high voltage DC transmission", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS~87, No. 3, Mar., pp. 884~892, 1968.
- 3) W. S. Wood, F. P. Flynn, and A. Poray, "Effects of Supply Voltage Waveform Distortion on Motor

- Performance”, Int. Conf. on Sources and Effect of Power System Disturbances, London, England, April 22-24, 1974.
- 4) 고원식 외 3, “직류전동기 가변속 구동장치의 고조파 저감을 위한 수동필터 제어시스템 연구”, 한국전기안전공사, pp. 16~81.
 - 5) C. A. Quinn, N. Mohan, “Active Filtering of Harmonic Currents in Three-phase, Four-Wire with Three-Phase and single-phase Non-Linear Loads”, in APEC, pp. 828~834, 1992.
 - 6) Thomas Key, Jih-Sheng Lai, “Analysis of Harmonic Mitigation Methode for Building Wiring system”, IEEE Trans on Power System, Vol. 13, No. 3, Aug., pp. 890~897, 1998.
 - 7) G. C Jain, “The Effect of Voltage Wave shape on the Performance of a Three Phase Induction Motor”, IEEE Trans, Vol. PAS-84, 1964.
 - 8) 김은식 외 1, 전력계통의 고조파 장애 분석, 한국전기안전공사, pp. 91~146.
 - 9) 한국산업기술센터, 전기설비 운용 및 관리, pp. 149~133, 2003. 6.
 - 10) 관동전기보안협회, “고압 자가용 수용가의 고조파 장애, 억제대책 사례 Q&A”, 성안당, 2000.
 - 11) IEEE 141-1993, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System”.
 - 12) 강창원 외 4, “전력계통에서의 고조파 개선 사례 연구”, 대한전기학회 2000년 하계학술대회 pp. 224~227, 2000.
 - 13) G. T. Heydt, Electric Power Quality, second Edition, Stars in a Circle Publications, Scottsdale(A/Z),u.s.a, 1994.
 - 14) 유상봉, 김세동, “전기설비의 고조파 장애 및 대책기술”, 한국전력기술인협회지, 1996. 5.
 - 15) Mark McGranaghan, “Overview of the Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems”, IEEE P519A Draft6, 1996I.
 - 16) “IEEE Recomend Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems”, IEEE Std. 519~1992.
 - 17) J. Arrillaga., D. A. Bradley., “Power System Harmonics”, John Willy & Sons, 1985.