

# 유도전동기의 전기적 특성에 미치는 고조파 전류의 영향

박양범<sup>†</sup> · 김두현

청주기능대학 전기과 · 충북대학교 안전공학과

(2004. 10. 28. 접수 / 2005. 4. 20. 채택)

## Influences of Harmonic Current on Electrical Characteristics of an Induction Motor

Yang-Birm Park<sup>†</sup> · Doo-Hyun Kim

Department of Electrical Engineering, Cheongju Polytechnic College

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received October 28, 2004 / Accepted April 20, 2005)

**Abstract** : This paper proposes the influences of harmonic current on electrical characteristics of an induction motor. Recently, a power system gets more worse as nonlinear load makes harmonics to affect energy lose of system and shorten life of machines. In this paper, the electrical effect and THD(Total Harmonic Distortion) of harmonic current to an induction motor which is of great use in the industrial fields are measured and analyzed. A power conversion equipment(inverter) is installed to produce harmonics and variable reactors are installed to reduce the harmonics having an effect on the input terminal. Then the effects of the reactors are measured and analyzed. Also average voltage, current, power and THD by harmonics are analyzed. The results show that THD is increased by increasing load of the induction motor and installing reactors. And the harmonics affecting the input terminal are decreased by increasing reactor 3[mH] to 6[mH], however, average power of the induction motor is decreased. Therefore, it is very important that reactors should be carefully installed considering the merits and demerits resulting from the installation of reactors.

**Key Words** : induction motor, harmonics, total harmonic distortion

### 1. 서론

산업의 정보화와 국민생활의 향상에 따라 전력 품질의 대한 욕구는 날로 높아져가고 있다. 과거 전력품질의 범주는 정전, 전압강하, 주파수변동 등 안정된 전원 공급에 주로 관심을 기울였다. 그러나 전력품질의 중요한 요소인 정현파 문제는 그 피해의 심각성이 크게 인식되지 않아 상대적으로 주목을 받지 못하고 있는 실정이다. 그런데 정현파와 관련하여 최근 가장 관심을 많이 가지는 부분이 고조파(Harmonics)다. 이러한 고조파는 각종 제어장치, 전력전자기기 등 다양한 반도체 전력변환 설비에 의한 것으로 특히 비선형 부하의 증가로 인해

전원측으로 많은 고조파 전류가 유출하게 되고 이 유출전류와 전원측 임피던스에 의한 전압 왜형이 발생하여 전력계통에 좋지 않은 영향을 미치고 있다<sup>1,2)</sup>. 이러한 문제는 수용가 구내에만 국한되는 것이 아니라 인근 다른 수용가와 배전설비에도 영향을 주고 있으며 그 정도가 심히 우려의 수준으로 나타나고 있다. 특히 동력부하 중에서 가장 사용빈도가 높은 삼상유도전동기의 경우 고조파로 인하여 운전중에 기계적인 진동, 노이즈와 고조파 전류 증가에 따른 효율저하 등을 초래하고, 궁극적으로 절연과피에 따른 전동기 수명단축 및 소손을 일으킬 우려가 높아지고 있다<sup>3)</sup>. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 규명하기 위하여 고조파 발생원인 전력변환장치(Inverter)를 이용하여 고조파 유입에 따른 전동기의 전기적 특성을 고찰하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
ybpark@kopo.or.kr

아울러 고조파로 인하여 전원의 전기적 품질 저하를 방지하고자 전원측에 리액터3[mH], 6[mH]를 각각 설치하여 전력변환장치에서 발생하는 고조파량을 전동기 부하측으로 유도하여 고조파 총왜형률을 측정하였으며, 삼상 평균전력 변화에 따른 유도전동기의 출력 변화를 실험·분석 하였다.

## 2. 이론

고조파(Harmonic)는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수를 말하는 것으로 일반적으로 왜형파는 기본파와 고조파로 분해해서 생각할 수 있다. 따라서 왜형파의 찌그러짐 정도는 n차 고조파의 크기 및 기본파에 대한 편위각 등의 크기에 따라 복잡하고 다양하게 나타난다. 고조파 중에서도 특히 3, 5, 7차 고조파가 현실적으로 문제가 되며 직류사용기기에서는 11차 이상의 고차 고조파가 다수 나타나기도 하며, Fig. 1은 고조파 파형발생을 나타낸 것이다.

최근 문제가 되고 있는 전기 사용 장소의 고조파 장애 현상을 쉽게 이해하는 방법은 Fig. 2와 같이 고조파를 전류원으로 해석하는 것이다. 전력변환기, 인버터, OA기기 등 반도체 응용기기와 같이 비선형 특성을 갖는 부하에 정현파 전압을 인가하면

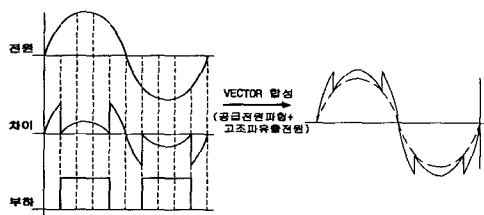


Fig. 1. A harmonic waveform

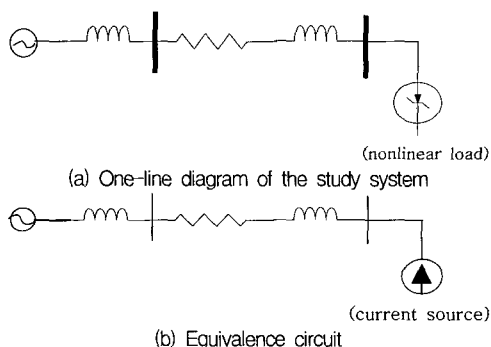


Fig. 2. Current source analysis for the study system with a nonlinear load

흐르는 전류는 일반적으로 고조파 함유율이 있는 왜형파의 형태가 된다. 이 전류를 분해하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{k=2}^{\infty} I_k \sin(k\omega t + \phi_k) \quad (1)$$

식 (1)에서,  $k : 2, 3, 4 \dots \infty$ ,  $I_1$  : 기본파 전류,  $I_k$  : k차 고조파를 나타내며, I는 상용주파수 성분 ( $I_1$ )과 그 정수배의 주파수 성분( $I_k$ )과 합성된 파형으로 나타난다<sup>4)</sup>. 즉 왜형파 전류는 각 고조파 성분의 중첩으로서 표현할 수 있다. 또한 고조파 레벨의 수준을 평가하고 관리하기 위해서는 고조파의 특성을 적절히 반영할 수 있는 지수가 필요하다. 이러한 지수는 측정을 통하여 결정될 수 있으며, 간단하면서도 실용적인 지수가 고조파 총왜형률(THD : Total Harmonic Distortion)이다. 기본파에 대한 고조파 함유율의 비율로 표현되는 총왜형률은 전압과 전류성분에 모두 적용할 수 있는데 식 (2)는 전압성분에 대한 고조파 총왜형률이며, 식 (3)은 전류 성분 고조파 총왜형률을 나타낸 것이다<sup>5)</sup>.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (2)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_n} \times 100\% \quad (3)$$

식 (2)에서  $V_n$ 는 개별공칭전압이며,  $V_1$ 는 부하설비가 전원에서 멀어질수록 전압강하가 크게 발생하므로 IEEE Std. 519-1996에서는 기본파 전압( $V_1$ ) 대신에 회로의 공칭전압  $V_n$ 를 적용하고 있다<sup>6)</sup>. 또한 식 (3)에서  $I_n$ 는 공칭전류를 나타내며 기본파 전류( $I_1$ ) 대신에 부하측 공칭전류  $I_n$ 를 적용한다.  $V_h$ ,  $I_h$ 는 개별전압, 전류 차수별 고조파

## 3. 실험장치 및 방법

유도전동기의 전기적 특성과 고조파 발생에 따른 영향을 실험하기 위하여 Fig. 3과 같이 실험회로를 구성하였으며, 전원 3 $\phi$ 380[V] 60[Hz]의 상용전

원에서 전동기 3.7[kW]의 전기적 특성 및 고조파 총왜형률을 측정하였다. 전원과 전동기 사이에는 전동기 보호를 위한 열동형계전기(Thr)와 전자접촉기(MC)를 설치하여 과부하로 인한 전동기를 보호하도록 하였다.

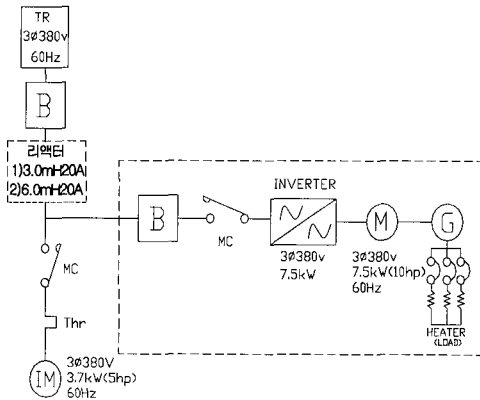


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup

또한 전동기의 전기적 특성을 실험하기 위하여 전동기 부하율을 가변하여 측정 하였으며, 전력변환장치(Inverter 7.5[kW])는 설치하지 않았다. 이와 같이 전동기 특성을 실험한 후 고조파 발생원인 전력변환장치를 전원측과 병렬로 연결하고 인버터 2차측의 히터부하량 조절에 따라 전동기의 전기적 특성변화를 측정하였다. 이때 히터부하는 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5[kW]로 가변하여 실험하였다. 또한 전원측으로 고조파 유입을 억제하기 위하여 리액터 3[mH]20[A], 6[mH]20[A]를 각각 설치한 상태에서 리액터 용량별 전동기측의 전기적 특성 및 고조파 총왜형률을 측정하여 리액터 설치 전·후를 비교하여 실험하였다. 그리고 인버터 2차측 전동발전기는 삼상전원을 단상전원으로 변환하기 위한 전동발전기로서 전압은 1φ220[V]이며 히터부하 전원을 위하여 적용한 M-G set이다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 부하율 변화에 따른 전동기 전기적 특성

전력변환장치를 설치하지 않고 상용전원에 의한 유도전동기 3.7[kW]의 전기적 특성을 측정하기 위하여 전동기 부하율을 5, 30, 50, 70, 90[%]로 가변하여 부하율 변화에 따른 전동기 특성변화는 Table 1과 같이 측정되었다. 평균전압은 5[%]의 부하율에

서 371.4[V]를 나타냈으며, 부하율이 점차 증가하여 90[%]의 부하율에서는 331.3[V]로 감소하였다. 그러나 전류는 3.12[A]에서 6.27[A]로 증가하는 것으로 보아 부하율 증가에 따른 전압 감소 및 전류의 증가를 알 수 있었다. 또한 전압 총왜형률 (Voltage Total Harmonic Distortion : VTHD)은 0.8에서 1.3[%]로 증가 하였으며, 전류 총왜형률(Current Total Harmonic Distortion : ITHD)도 1.0[%]에서 2.1[%]로 증가하였다. 이와 같은 실험 결과는 회전기인 전동기 운전에 따른 고조파 발생이 있음을 알 수 있었으며, 전동기 부하율 증가에 따라 총왜형률도 비례하여 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 4와 5는 전동기 부하율 변화에 따른 유도전동기의 평균전압, 전류 변화를 나타낸 것으로 전동기 부하율 증가에 따라 전압의 감소를 나타내고 있으며, Fig. 6은 이때의 평균전력을 나타낸 것으로 부하율 증가에 따라 전력은 0.210[kW]에서 3.405[kW]로 상승함을 알 수 있다. 또한 Fig. 7은 부하율 증가에 따른 전압, 전류고조파 총왜형률의 증가함을 나타낸 것이다.

Table 1. Measurement of electrical characteristics of the induction motor

Division	Item	Load Factor[%]				
		5	30	50	70	90
3φ Average	Voltage[V]	371.4	350.4	348.5	345.8	331.3
	Current[A]	3.12	3.63	4.03	5.21	6.27
Unbalance	Voltage[%]	0.5	0.6	0.7	0.7	0.9
	Current[%]	7.4	6.3	5.1	4.7	4.4
3φ Average	power[kW]	0.210	1.392	1.756	2.683	3.405
	PF	0.51	0.57	0.62	0.76	0.84
THD	VTHD[%]	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3
	ITHD[%]	1.0	1.4	1.5	1.8	2.1

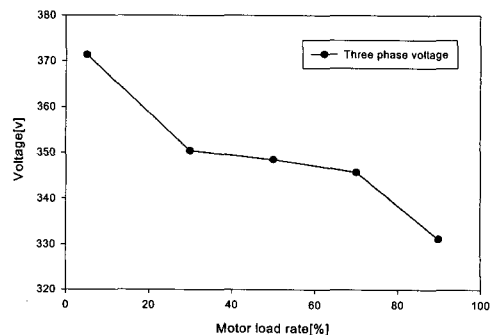


Fig. 4. Plots of motor load rate versus voltage

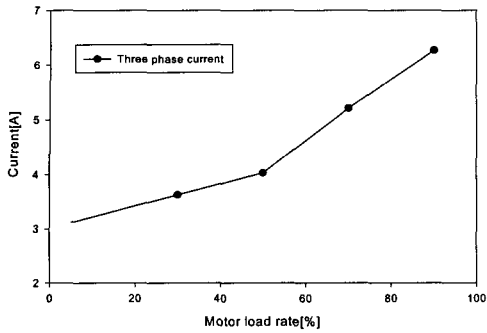


Fig. 5. Plots of motor load rate versus current

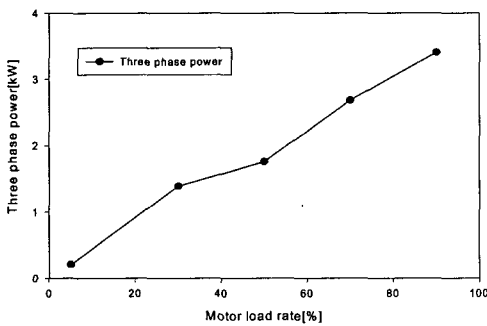


Fig. 6. Plots of motor load rate versus three phase power

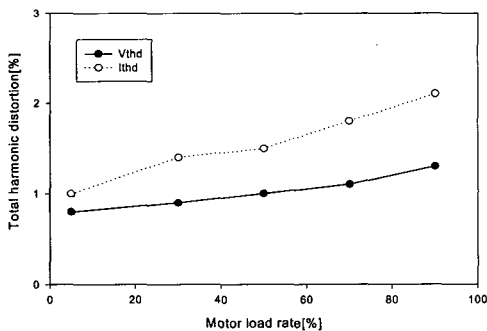


Fig. 7. Plots of motor load rate versus total harmonic distortion

#### 4.2. 전력변환장치 설치에 따른 전동기 특성

전력변환장치를 전원과 병렬로 연결하고 히터부하량을 가변한 상태에서 실험한 전동기의 전기적 특성은 Table 2와 같다. 평균전압과 전류는 감소한 것을 알 수 있고, 불평형율과 전력은 거의 변화가 없었다. 그러나 전압, 전류 총왜형율은 히터부하량 증가에 따라 전압 총왜형율은 3.3[%]에서 5.8[%]로 증가하였고, 전류 총왜형율은 5.8[%]에서 9.8[%]로 증가함을 알 수 있었다. Fig. 8은 이때의 전압, 전류총왜형율을 나타낸 것으로 히터부하 증가에 따라 점진적으로 증가함을 알 수 있었다.

Table 2. Measurement of electrical characteristics of the induction motor with the power conversion equipment

Division	Item	5[%] Load	Heater Load[kW]				
			2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
3 $\phi$ Average	Voltage[V]	371.4	368.6	367.9	367.2	366.7	365.8
	Current[A]	3.12	3.08	3.08	3.06	3.06	3.04
Unbalance	Voltage[%]	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
	Current[%]	7.4	5.2	5.2	5.3	5.4	5.4
3 $\phi$ Average	Power[kW]	0.210	0.207	0.198	0.196	0.193	0.189
	PF	0.51	0.1	0.1	0.1	0.1	0.09
THD	VTHD[%]	0.8	3.3	3.1	3.9	4.7	5.8
	I THD[%]	1.0	5.8	7.6	8.1	8.6	9.8

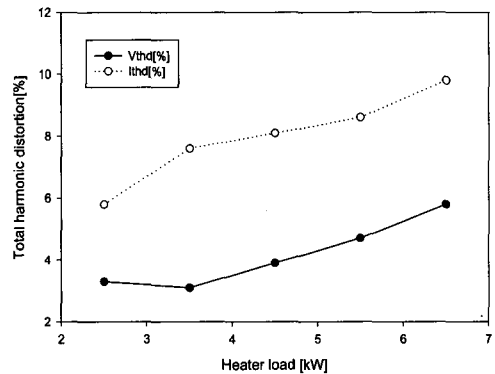


Fig. 8. Plots of total harmonic distortion versus heater load of power conversion equipment

#### 4.3. 전력변환장치와 리액터 설치후 전동기 특성

고조파가 유입된 유도전동기의 전기적 특성을 비교, 분석하기 위하여 전력변환장치와 리액터를 설치하여 실험한 결과 Table 3과 같다. 전원측에 리액터를 3[mH]와 6[mH]를 각각 설치하였을 때 전압 총왜형율은 18.9[%]에서 23.2[%], 전류총왜형율은 31.0[%]에서 38.2[%]로 증가하였음을 나타내고 있다. 이와 같은 실험결과는 전원측에 리액터 설치시 전력변환장치에서 발생하는 고조파가 부하측 전동기로 유입되었음을 나타낸 것이다. 또한 고조파 증가에 따라 평균전력도 0.210[kW]에서 리액터 용량에 따라 0.189, 0.158[kW]로 각각 감소하였다. 이와 같은 결과를 토대로 분석하여 보면 전원측 고조파 유출량이 리액터 설치로 인하여 부하측 유도전동기로 이동하였음을 알 수 있고, 전동기측의 고조파 유입량 증가로 인하여 평균전력 감소에 따른 출력의 감소가 있음을 알 수 있다.

Table 3. Measurement of electrical characteristics of induction motor with power conversion equipment and variable reactor

Division	Item	5[%] Load	Reactor 3[mH] 20[A]					Reactor 6[mH] 20[A]				
			2.5 [kW]	3.5 [kW]	4.5 [kW]	5.5 [kW]	6.5 [kW]	2.5 [kW]	3.5 [kW]	4.5 [kW]	5.5 [kW]	6.5 [kW]
3φ Average	Voltage[V]	371.4	362.3	354.6	343.1	335.8	331.2	338.2	330.1	324.3	312.5	302.1
	Current[A]	3.12	2.89	2.86	2.83	2.75	2.70	2.71	2.64	2.60	2.56	2.45
Unbalance	Voltage[%]	0.5	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1	0.7	0.9	1.2	1.2	1.3
	Current[%]	7.4	6.5	7.1	7.9	8.3	9.1	5.2	7.4	8.8	10.7	12.2
3φ Average	Power[kW]	0.210	0.205	0.201	0.196	0.189	0.183	0.191	0.184	0.178	0.162	0.158
	PF	0.51	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
THD	VTHD[%]	0.8	9.2	12.5	14.2	16.5	18.9	11.1	13.9	17.6	19.8	23.2
	ITHD[%]	1.0	15.2	19.6	24.2	28.7	31.0	19.4	23.8	28.5	32.7	38.2

Fig. 9와 10은 전력변환장치 2차측의 히터부하를 설치하여 전원측에 3[mH]20[A], 6[mH]20[A]리액터를 설치하였을 때 히터부하 가변에 대한 유도전동기의 평균전압, 전류 변화를 나타낸 것이다. 3[mH] 설치시 보다는 6[mH]를 설치했을 때 전압강하가 크게 나타났으며, 동시에 전류감소가 일어나는 것

으로 보아 전동기의 출력 감소가 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 11은 이때의 평균전력으로 히터부하의 증가에 따라 전력의 감소를 나타내고 있다. Fig. 12는 히터부하 변화에 대한 리액터 용량별 전압, 전류 총왜형률을 나타낸 것으로, 리액터 용량이 클수록 고조파 총왜형률은 높아짐을 그림으로 확인할 수 있었다.

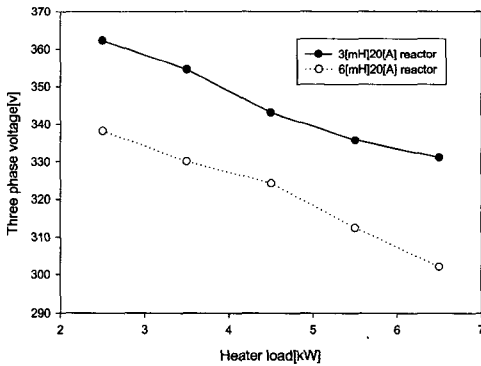


Fig. 9. Plots of voltage versus heater load according to reactor capacity

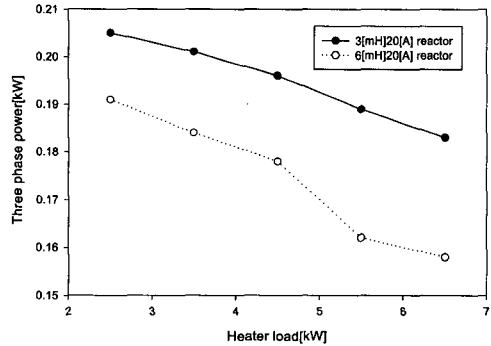


Fig. 11. Plots of three phase power versus heater load according to reactor capacity

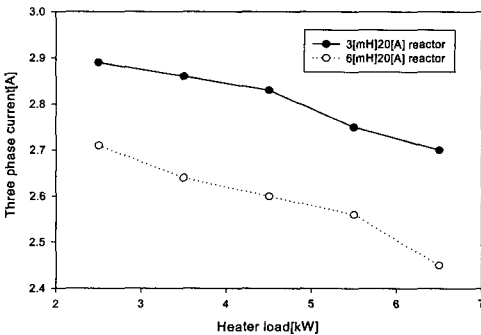


Fig. 10. Plots of current versus heater load according to reactor capacity

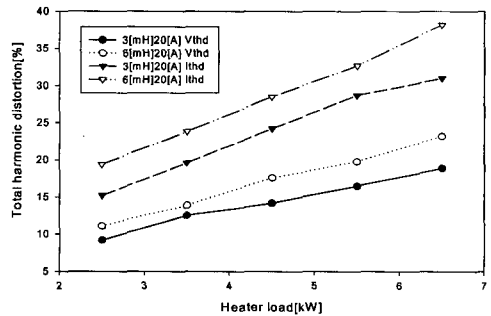


Fig. 12. Plots of total harmonic distortion versus heater load according to reactor capacity

## 5. 결 론

본 논문은 전력변환장치에서 발생하는 고조파로 인한 삼상유도전동기의 전기적 특성과 고조파 총왜형률을 측정하고 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 5[%]의 부하율을 기준으로 5단계 히터부하량 가변시 유도전동기 3.7[kW]에 유입되는 고조파 총왜형률을 측정된 결과 고조파 발생원인 전력변환 장치에 의하여 총왜형률은 히터부하량 증가에 따라 비례하여 증가함을 확인할 수 있었다.

2) 전원측 리액터를 용량별로 설치하여 분석한 결과 3[mH]일때 전압 총왜형률은 최고 18.9[%], 전류 총왜형률은 31.0[%]였으나, 6[mH]리액터 설치시에는 전압 총왜형률 23.2[%], 전류 총왜형률 38.2[%]로 대단히 높게 나타나는 것으로 리액터의 증가에 따라 전원으로의 고조파 유입차단 효과가 높게 나타남을 알 수 있다.

3) 전력변환장치 2차측 히터부하를 가변하여 6.5 [kw]로 설정후 3[mH] 리액터를 설치했을때 전동기 평균전력은 0.183[kW]이었으며, 6[mH] 리액터를

설치한 경우에는 0.158[kW]로 전력이 감소하는 것으로 보아 전동기 출력의 감소가 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) 김은식 외 1, 전력계통의 고조파 장애 분석, 한국전기안전공사, pp. 91~146.
- 2) 한국산업기술센터, 전기설비 운용 및 관리, pp. 119~133, 2003. 6.
- 3) 강창원 외 4명, “전력계통에서의 고조파 개선 사례 연구”, 대한전기학회 2000년 하계학술대회, pp. 224~227.
- 4) G.T. Heydt, Electric Power Quality, second Edition, Stars in a Circle Publications, Scottsdale(A/Z),u.s.a, 1994.
- 5) Mark McGranaghan, “Overview of the Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems”, IEEE P519A Draft6, 1996.
- 6) “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems”, IEEE Std. 519~1992.