

# EDSA를 이용한 수용가 설비의 전력품질 분석

(A study of the Distribution system of Harmonic Analys and reduction of EDSA)

김용하 · 이 범 · 이성준\* · 이재걸 · 연준희

(Yong-Ha Kim · Buhm Lee · Sung-Joon Lee · Jae-Girl Lee · Joon-Hee Yeon)

(Dept of Electrical University of Incheon)

## Abstract

This paper describes analysis of power quality in distribute network system. EDSA is used for simulations to the real model system. Harmonic load flow, harmonic frequency scan studies, distortion levels, and filter design method.

Through this paper, minimized injected harmonic by computing the capacitor of optimal filter satisfied with IEEE Std-519 applying to distribute system are analysed through detailed simulation.

## 1. 서 론

전력변화 기술은 우리 사회가 지향해 가는데 필요한 요소가 되고 있는 기술이며, 그 역할과 중요성이 증대 될 것으로 예측되는 기술로서 향후 거의 모든 전기에너지는 전력 변환 장치에 의해 변화 후 더욱 더 사용이 증대될 것으로 예측된다. 다만 이러한 기술의 응용에 있어 중요한 문제점의 하나로는 필연적, 파생적으로 나타날 수밖에 없는 전력 품질(파형의 왜곡)에 대한 문제점이 지적되고 있다.

고조파 발생원 부하기기는 그 자체의 성질상 전원에서부터 왜형파 전류를 소모하므로 계통에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 계통내를 순환하는 고조파 전류를 흘리거나 계통내의 전압파형을 찌그러뜨리면서 다른 기기에 악영향을 끼치게 된다. 또한, 접속된 다른 부하나 주변의 전자기기 또는 통신선과 신호선 등에 미치는 영향도 고려해야 한다.

본 논문에서는 전력품질에 영향을 끼치는 고조파에 대하여 EDSA를 통해 계통을 분석하였고, 고조파의 발생이 IEEE Std 519-1992 규정을 만족시키는 Single-tuned first-order filter를 설계하여 최소의 비용으로 최적의 필터위치를 선정하도록 하였다.[1]

## 2. EDSA의 기능

EDSA 미국의 EDSA Micro사가 개발한 전력계통 해석Tool로써 Short Circuit, Load Flow, Motor Starting, Device Coordination, Wire-Sizing, Harmonics, Transient Stability의 분석기능을 가지고 있다. EDSA에서 Harmonic분석은 계통의 구성과 고조파원을 입력(부하의 종류에 따라서 스펙트럼을 제공)하고 Fundamental Frequency Load Flow를 수행하고

Harmonic Load Flow를 실행하여 각 모선에 유도되는 고조파전압을 조합하여 식(1)에 적용하여 THD를 계산한다. 그 계산결과가 기준치를 초과하였거나 System Designer가 원하지 않는 고조파전압이 유도가 되면 고조파 전압을 저감하기 위해서 Frequency Scan을 실행한다. 그 결과를 통해서 계통에 고조파의 영향을 최소화 할 수 있는 필터를 설계하고 필터를 설치한 후 이전에 논했던 방법에 따라서 다시 Harmonic분석하는 과정의 기능을 제공한다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_{nRMS}^2}}{I_{1RMS}} \quad (1)$$

단,  $I_{nRMS}$ : 고조파 전류의 평균값

$I_{1RMS}$ : 기본파 전류의 평균값

그림1 에서부터 그림4는 EDSA에서 고조파 분석을 수행하기 기능의 결과 화면을 나타낸 것이다.

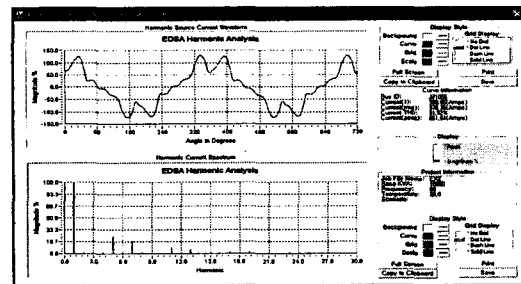


그림 1. 고조파 Spectrum의 결과  
Fig 1. Results of harmonic spectrum

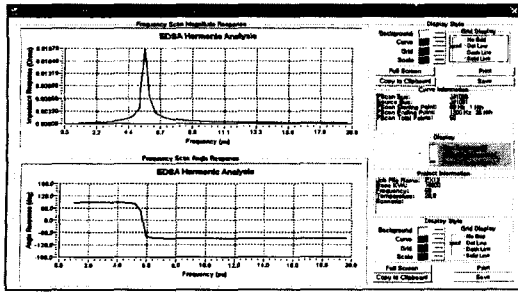


그림 2. Frequency scan의 결과  
Fig. 2. Frequency scan of EDSA

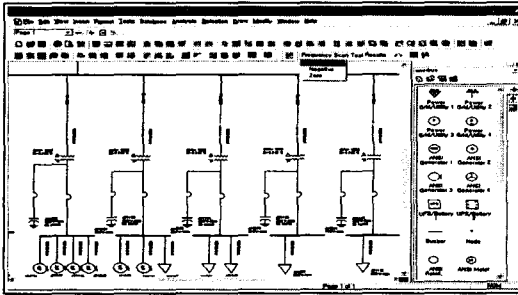


그림 3. Harmonic load flow의 결과  
Fig. 3. Results of harmonic load flow

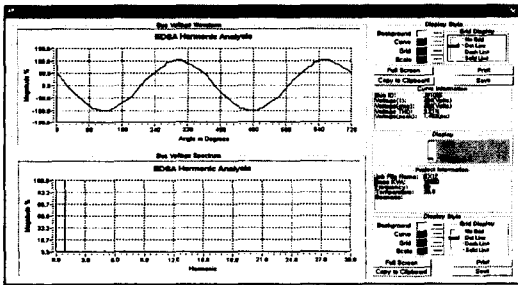


그림 4. THD Graphic Simulation 결과  
Fig. 4. Results of THD graphic simulation

### 3. 전력품질

#### 3.1 전력품질 해석

최근 전력품질에 대한 관심이 높아지고 있는데 전력 품질에는 Impulsive Transients, Oscillatory Transients, Sag와 Swell, Under Voltage, Over Voltage, Voltage Flicker 그리고 Harmonic등의 평가 방법이 있는데 본 연구에서는 Harmonic Analysis와 Filter Design에 대한 연구를 행하였다. 아래의 표 1. 은 전력품질의 종류와 그 원인을 나타내며, 그림 5는 전형적인 전력신호 외란을 나타내고 있다.[2]

표 1. Power Quality의 종류와 원인  
Table 1. Cause and kind of Power Quality

|                               | Typical Causes  |
|-------------------------------|---|
| Impulsive Transients          | Lightning<br>Electro-static Discharge<br>Load switching       |
| Oscillatory Transients        | Line/Cable switching<br>Capacitor switching<br>Load switching |
| Sag & Swell                   | Remote System Faults<br>System Protection                     |
| Under Voltage<br>Over Voltage | Motor Starting<br>Load Variations                             |
| Voltage Flicker               | Intermittent Loads<br>Motor Starting<br>Arc Furnace           |
| Harmonic                      | Nonlinear Loads<br>System Resonance                           |

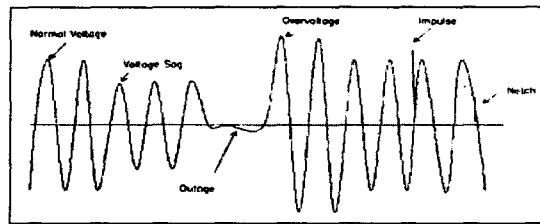


그림 5. 전력신호 외란  
Fig. 5. Typical distortion of power system

#### 3.2 Filter Design

필터는 그림 6과 같이 단일 동조필터와 2차형 고차 필터로 나눌 수 있다.

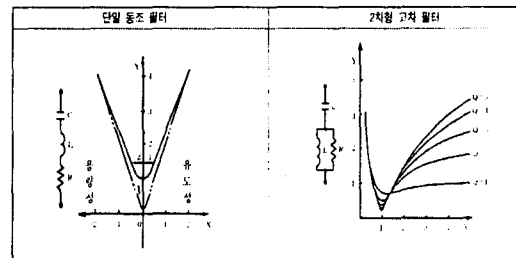


그림 6. 단일 동조 필터와 2차형 고차 필터  
Fig 6. Single-tuned first-order filter and High-pass second-order filter

본 연구에서는 고조파의 영향을 저감하기 위한 방법으로 간단한 구조와 경제성에 이유로 산업현장에서 실제로 많이 사용되고 있는 Single-tuned first-order filter를 설계하여 적용하였는데 Single-tuned first order filter는 정해진 주파수를 공진 주파수로 하는 L과 C의 직렬조합으로 이루어지므로 설계시 고려하고자 하는 주파수의 고조파만 필터로 흘러들어서 계통에는 영향을 저감시키는 Passive filter의 한 종류이다.

Single-tuned first-order filter의 각 요소의 값들

을 정하는 과정은 아래와 같이 하였다.[7]

1) Data Input (Filter Design에 필요한 데이터를 입력)

- 변압기 1차,2차 전압[KV]
- 변압기 용량 [MVA]
- 변압기 %임피던스 [%]
- 변압기의 단락 용량 [KW]
- 부하전력 사용전압[KV]
- 부하정격전류[A]
- 필터를 작동시키는 고조파 차수[th]
- 부하고조파 (필터디자인차수) 함유량[%]
- 사용주파수[Hz]

2) PF의 조절을 위한 Capacitor용량(Reactive Power)산정

계통의 역률을 일정치 이상으로 하기위해서 역률을 보상하기위한 capacitor의 용량을 계산하면,

$$Q_c = P_L (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) [KVAR] \quad (2)$$

단,  $\tan \theta_1$ : 역률보상전의 역률 각

$\tan \theta_2$ : 역률보상후의 역률 각

3) Resonance문제의 해결을 위한 Filter의 주파수결정

$$f_0 = 2\pi f_0 \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVAR_C}}$$

$$SCR = \frac{MVA_{sc}}{MW_{max}} \quad (3)$$

단, SCR : Short-circuit ratio(단락비)  
 $MVA_{sc}$ : Capacitor의 접속점에서의 Short-circuit용량[MVA]

$$MVA_{sc} = \frac{kV^2}{X_T} = \frac{100MVA_T}{Z\%} = [MVA] \quad (4)$$

여기에서

$$X_T = \frac{Z\%}{100} \frac{kV^2}{MVA_T} \quad (5)$$

단,  $MVAR_C$ : Capacitor용량[Kvar]  
 $MW_{rect}$ : 보상기의 용량[MW]

4) Filter의 R, X<sub>C</sub>, X<sub>L</sub>, 용량계산

$$X_C = \frac{V^2}{MVAR_C} [\Omega]$$

$$X_L = \frac{X_C}{r \times h} [\Omega] \quad (6)$$

단, r: 경험적인 값으로 5고조파의 경우 0.94를 적용시킨다.

h: 고조파차수 $MVAR_C$ 는 Designer가 선정한 용량

Filter로 전달되는 무효전력  $Q_F$  는

$$Q_F = \frac{KV^2}{X_C - X_L} [KVAR] \quad (7)$$

Capacitor의 전류용량  $I_{Crated}$ 과 Filter 유입전류 $I_F$ 는

$$I_{Crated} = \frac{KVAR_C}{\sqrt{3} \times KV} [A] \quad I_F = \frac{Q_F}{\sqrt{3} \times KV} [A] \quad (8)$$

기본파전류  $I_1$ 과 각 조파의 Filter의 동조전류  $I_N$ 은

$$I_1 = \frac{MW_{rect}}{\sqrt{3} \times KV} [A] \quad I_N = I_1 \times ratioN [A] \quad (9)$$

필터에 유입되는 외형파의 RMS는

$$I_{Frms} = \sqrt{I_1^2 + I_N^2} [A] \quad (10)$$

Capacitor의 기본파전압  $V_1$ 과 고조차 성분전압  $V_N$

$$V_{C1} = \sqrt{3} \times I_1 \times X_C [V]$$

$$V_{CN} = \sqrt{3} \times I_N \times \frac{X_C}{N} [V] \quad (11)$$

Capacitor의 전압 실효값과 전압 최대치는

$$V_{Crms} = \sqrt{V_{C1}^2 + V_{CN}^2} [V],$$

$$V_{Cpeak} = \sqrt{2} \times V_{C1} + \sqrt{2} \times V_{CN} [V] \quad (12)$$

Filter로 유입되는 무효전력  $Q_{CF}$ 는

$$Q_{CF} = \sqrt{3} \times V_{Crms} \times I_{Frms} \quad (13)$$

으로 필터가 설계 되었다.[7]

### 5) Checking capacitor limits

Shunt Power Capacitor를 위한 ANSI/IEEE 18-1980규격은 다음과 같다.

표 2. Shunt Power Capacitor를 위한 규정  
Table 2. Regulations for shunt power capacitor

|      | Maximum Limits (전파/기본파) |
|------|-------------------------|
| 실효전류 | 180 %                   |
| 실효전압 | 110 %                   |
| 최대전압 | 120 %                   |
| 무효전력 | 135 %                   |

### 6) Select larger capacitor Bank rate

(5)에서 위반되는 값이 발생되면 Capacitor Bank의 용량(VAR)을 상향조정 하여 다시 Design하고 규격과 다시 비교를 한다.

### 3.3 고조파해석과 Filter design의 흐름도

고조파 해석을 위해서는 먼저 계통의 충분한 Data가 필요하다. 그것은 모델 계통을 실제의 계통에 가장 가깝게 구성하기 위해 중요하다. Harmonic Scan, Harmonic Load flow, THD 계산 등의 과정을 통하여 모선별 IEEE Std-519 규격을 만족시키는 고조파 억제 를 위한 Filter를 디자인 하여 계통에 적용시켜 필터용 량을 작게 하면서도 규제치를 만족 시키는 고조파 해석 과 Filter의 디자인을 위한 흐름은 다음과 같다.

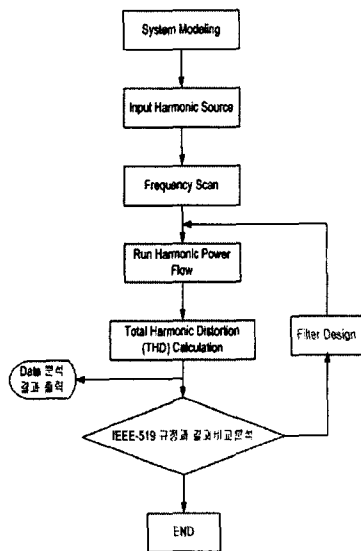


그림 7. 고조파 해석을 위한 흐름도  
Fig 7. Flow chart of Harmonic analysis

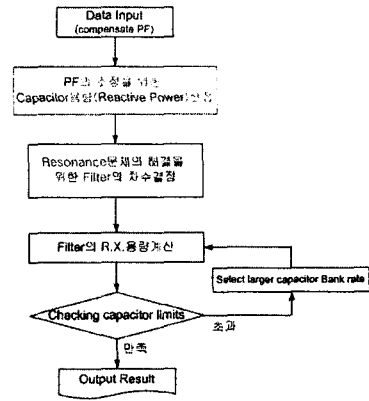


그림 8. 필터 디자인을 위한 흐름도  
Fig 8. Flow chart of Filter Design

## 4. 사례 연구

### 4.1 모델계통의 분석

모델계통은 그림 9 와 같은 계통으로 수전용량 6300[KVA], 전압 22.9[KV]의 현재 건설 진행 중인 경기장의 설비 계통의 일부를 선정하였다. 부하는 전등부하, 전광판, 음향 및 통신기기, 경기장 조명, 냉·난방 동력 및 일반 동력 등으로 다양하게 구성되어있다.

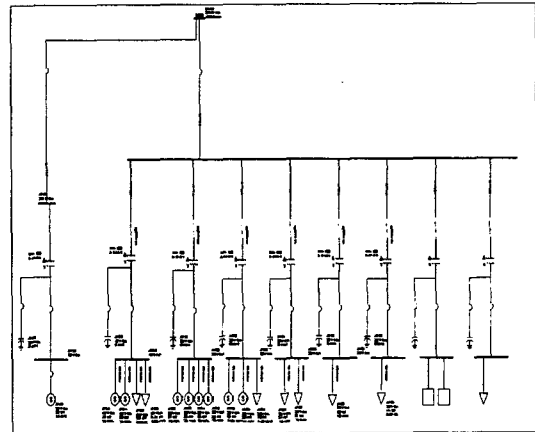


그림 9. 모델 수용가의 수전계통도  
Fig 9. Diagram of distribute network

본 모델계통의 분석을 통해서 완공시의 고조파 발생 원에 따른 고조파 왜형률의 크기를 비교 분석 하였으며, 고조파 왜형률이 IEEE Std-519 규정을 만족시키는 필터를 디자인 하였다.

모델계통을 분석하기 위하여 계통의 부하에서 발생 되는 고조파의 대표 Spectrum을 계통에 주입하여 수용 가 고조파 응답을 분석하였다.

계통에는 가변속전동기와 조명부하 그리고 컴퓨터부 하가 주 부하이므로 이 부하들에서 발생될 수 있는 대

표적인 고조파원으로 그림10 에서부터 그림12의 스펙트럼을 사용하였다.

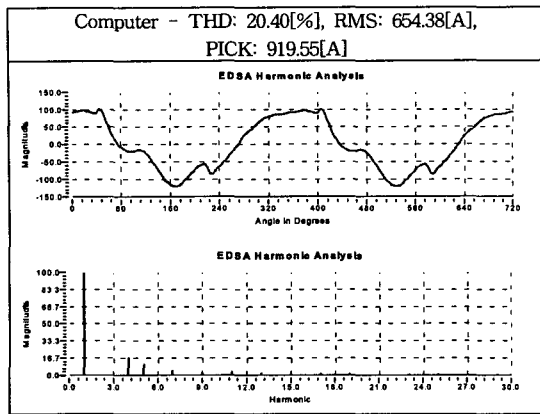


그림 10. 컴퓨터 부하의 전류파형과 고조파스펙트럼  
Fig 10. Waveform and Harmonic spectrum of computer

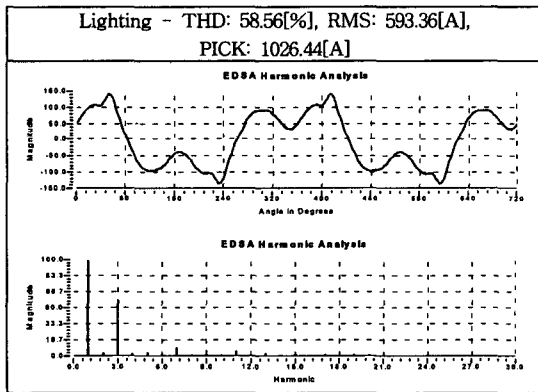


그림 11. 전등부하의 전류파형과 고조파 스펙트럼  
Fig 11. Waveform and Harmonic spectrum of Light

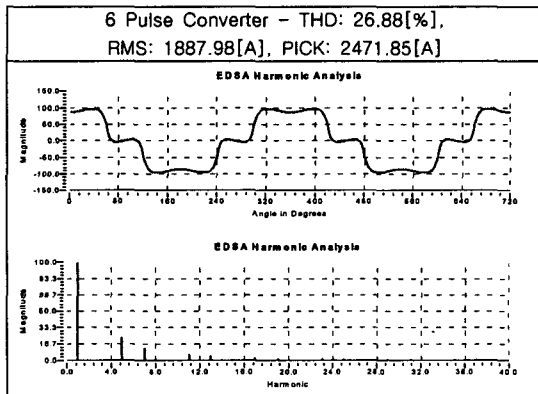


그림 12. 6 Pulse Converter 부하의 전류파형과 고조파 스펙트럼  
Fig 12. Waveform and harmonic spectrum of 6pulse convertor

위의 스펙트럼을 입력으로 하여 Harmonic Scan과 Harmonic load flow, THD를 수행하였다.

그림 13과 그림14는 Harmonic scan을 실행한 결과로 계통의 임피던스가 4~6pu에서 공진점을 찾았다.

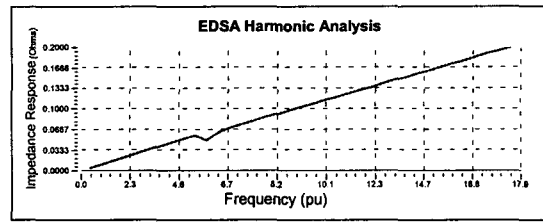


그림 13. 일반 동력모선에서의 주파수 Scan결과  
Fig 13. Results of frequency scan at normal busbar

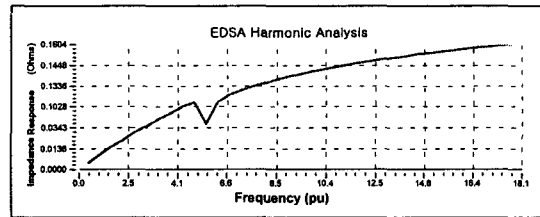


그림 14. 전등·전열부하모선에서의 주파수 Scan결과  
Fig 14. Result of frequency scan at light busbar

이 고조파 주파수가 상위 계통에 영향을 미칠 수 있음을 알게 되었고, 그림 15는 Harmonic power flow를 수행한 결과로서 냉·난방 모선에서의 고조파 전류의 흐름이 인접 모선에 비해 크게 나타나고 있음을 분석하였다.

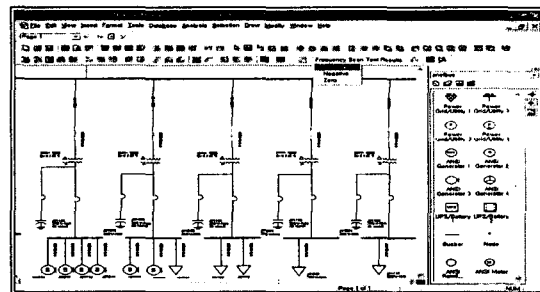


그림 15. Harmonic load flow의 결과  
Fig 15. Results of harmonic load flow

또한, 고조파에 의한 전체 왜형률을 분석하기 위해 각 모선에서의 전압 THD를 구하였다. 표 3 는 각 모선에서의 전압 THD를 구한 것이다. 그 결과 각 모선에서의 THD 값이 IEEE Std-519 규정의 총 전압 왜형률 5%를 벗어났다. 이것은 계통의 신뢰성과 기기에 영향을 주므로 고조파 왜형률을 5% 이내로 낮추어야 한다.

표 3. 각 모선에서의 고조파 왜형을  
Table 3. Total harmonic distortion at busbar

| Total Harmonic Distortion(THD) |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|
| #                              | BUS ID | THD    |
| 1                              | CAPCO  | 5.71 % |
| 2                              | 중앙모선   | 5.71 % |
| 3                              | 일반동력   | 5.99 % |
| 4                              | 냉·난방모선 | 5.74 % |
| 5                              | 비상동력   | 5.84 % |
| 6                              | 전동전열   | 5.85 % |
| 7                              | 경기장조명  | 5.82 % |
| 8                              | 음향·통신  | 5.74 % |
| 9                              | UPS    | 5.30 % |
| 10                             | 전광판    | 5.78 % |
| 11                             | 빙축열냉방  | 5.70 % |

시뮬레이션 결과 계통에서 제 5차 고조파를 제거하기 위해 각 모선에 디자인 된 필터를 그림 16과 같이 각각 설치하였다.

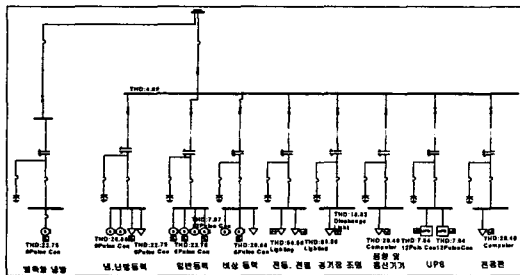


그림 16. 모선별 필터 설치 후의 THD 결과  
Fig 16. Results of node considering the filter

분석한 결과 일반동력 모선, 냉·난방동력 모선, 전동·전열모선에서 필터의 용량이 작게 나타났다. 반면에  $X_L$ 과  $X_C$ 의 크기는 전동·전열모선이 작게 나타났다. 또 Capacitor의 경우 냉·난방동력이 가장 적게 되었다. 종합적으로 필터의 용량과 Capacitor의 용량을 고려하고, THD의 값이 IEEE Std-519규격을 만족하는 곳이 냉·난방동력 모선이 됨을 알 수 있었다. 표 4는 필터와 Capacitor의 용량을 고려 할 때 가장 경제적인 모선을 나타낸 결과이다.

표 4. Filter를 고려한 모선별 결과(기본주파수 60Hz)  
Table 4. Results of node considering the filter

|           | 일반동력모선 | 냉·난방동력 | 전동,전열모선 |
|-----------|--------|--------|---------|
| 필터용량[kva] | 15.1   | 14.5   | 15.9    |
| 캐패시터용량    | 50.1   | 49.7   | 51.9    |
| 역률        | 90     | 90     | 90      |
| R         | 0.027  | 0.028  | 0.025   |
| $X_L$     | 0.453  | 0.471  | 0.431   |
| $X_C$     | 10.017 | 10.396 | 9.525   |
| THD       | BUS    | 4.98   | 4.97    |
|           | Branch | 2.17   | 2.19    |

위의 결과에서 냉·난방동력 모선의 결과가 THD를

IEEE-519 규격에 적합하도록 (Bus : 4.99[%], Branch : 2.19[%])하면서 Filter Rate(14.5[Kvar])와 Capacitor Rate(49.7[Kvar])가 최소로 되는 최적의 필터설계와 위치를 분석하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현재 건설 중에 있는 경기장 계통을 EDSA를 이용하여 전력품질에 영향을 미치는 고조파 현상을 시뮬레이션 하였다. Harmonic Load flow를 실행하여 고조파 발생원에 의한 고조파 전류의 흐름을 분석하였다. 또 각 모선별 전압 왜형율을 계산하여 IEEE Std-519의 규격에 적합하도록 필터를 디자인 하였으며, 모선별로 Filter를 설치하여 Filter의 용량이 적으면서 Capacitor의 용량을 작게 하고, 규제치를 만족시키는 Filter를 선정하여 계통에 적용시킴으로서 고조파를 억제 하였다. 본 모델 계통이 건설 중에 있기 때문에 이러한 다양한 분석기법을 통하여 경기장 수전계통의 운용과 부하 관리의 기본적인 자료로 활용되어 전력계통의 전력품질 향상에 기여할 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) 김용하, 김중국 “電力系統의 高調波 分析 및 低減 對策에 관한 研究” 인천대학교 2000, 6
- (2) 김성덕 “전력품질의 진단과 분석기술 동향과 전망” 전기학회지. Vol.50, No.3 2001, 3
- (3) 김재철, 윤상윤 “배전계통의 전력품질 및 신뢰도 평가의 방법” 전기학회지. Vol.50, No.3, 2001, 3
- (4) 이은철 “전기 사용 장소의 고조파 장애 분석 연구” 한국전기안전공사 1996
- (5) IEEE Industry Applications Society & Power Engineering Society, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System” IEEE Std 519-1992
- (6) “Study of Distribution System Surge and Harmonic Characteristics” EPRI Report EL-1672, Project 1021-1, 1980
- (7) Enrique Acha, Manuel Madrigal “Power System Harmonic” Wiley & Sons, Ltd 2001 pp65-68