

배전변전소에서 캐패시터 뱅크 투입시 일어나는 전자과도 현상에 관한 연구

(A Study on the Electromagnetic Transients at Switching Capacitor Banks in a Electric Distribution Electric Power Distribution Substation)

김경철*

(Kyung-Chul Kim)

요 약

배전변전소에서 과도현상은 주로 스위칭으로 인해 발생한다. 본 논문에서는 스위칭 서지 현상을 분석하고, 과도현상을 저감시키는 방법을 상용화된 EDSA의 EMTAP 프로그램을 이용하였다. 과도현상으로 인한 전압의 크기를 제한하는 방법으로 부하측의 역률개선용 캐패시터 뱅크를 고조파 필터로 변환시켰다. 캐패시터 뱅크에 직렬로 연결된 인덕턴스는 부하측에 적절한 수준의 전압으로 낮출 수가 있었다. 또한 EDSA의 고조파 분석 프로그램으로 시뮬레이션한 결과는 고조파 저감 효과도 검증할 수 있었다.

Abstract

Transient in an electric distribution system are mainly generated by switching. This paper presents analysis of switching surge and means of limiting the voltage magnification transient for high voltage power systems by using the EDSA's EMTAP software package. One means of limiting the voltage magnification transient is to convert the end-user power factor correction capacitor banks to harmonics filters. An inductance in series with the capacitor bank was used to decrease the transient voltage at the customer bus to acceptable levels. And also simulation results used the EDSA harmonics analysis program show the effect of harmonics reduction.

Key Words : Electromagnetic Transient, Switching Surge, Power Factor Correction, Harmonic Filter

1. 서 론

전력계통해석 분야에서 전자과도 현상의 분석은 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 주로 배전변전소

에서 스위칭시 일어나는 과도현상을 분석하기 위해서 이다[1][2]. 스위칭은 전력시스템에서 전압이나 전류를 공급하거나 제어하는 작용이다. 전기회로에서는 인덕턴스가 존재하기 때문에 전류가 흐르면 자속이 생기고 역기전력이 발생한다. 스위칭 속도가 빠를수록 더 큰 역기전력이 생기게 된다. 인덕턴스에 저장된 에너지는 캐패시터에 전달되고, 에너지는 인덕턴스와 캐패시터 사이를 오가게 된다. 이 때 전원측과 부하측에 고조파 동조가 일어나게 되고 그 수

* 주저자 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : jdkhsr@orgio.net
접수일자 : 2001년 11월 7일
1차심사 : 2001년 11월 12일 2차심사 : 12월 10일
심사완료 : 2001년 12월 19일

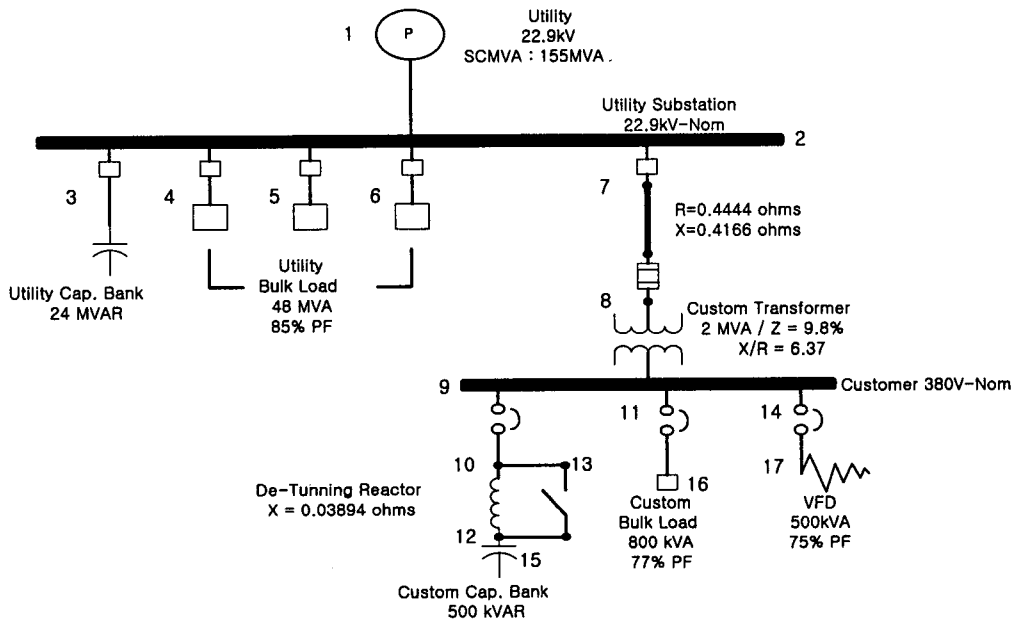


그림 1. 사례연구 배전 시스템
Fig 1. Single-line Diagram of the Distribution System Under Study

치는 기본전압 과고치를 몇 배나 상회하는 큰 값이 될 수도 있다. 이러한 이상전압은 저항소자에 무리를 주게되고 결국 여러 가지 장애를 나타나게 한다.

배전변전소에서 역률개선용으로 콘덴서 뱅크를 설치 운영하고 있다. 전력회사에서 캐패시터 뱅크를 투입시 일어날 수 있는 스위칭 과도 현상으로 부하측에 이상전압이 발생하여 피해를 주게 된다. 이와 같은 과도 전압을 방지하기 위한 목적으로 부하측에 역률개선용 콘덴서 뱅크에 직렬로 리액터를 설치한다. 콘덴서용 직렬 리액터가 과도전압상승을 방지 할 뿐만아니라 고조파 저감효과도 있음을 알아보기로 한다.

2. 사례연구

2.1 사례연구 계통도

그림 1은 사례연구 배전시스템의 계통도이다. 배전 변전소는 공급전압이 22.9[kV], 단락용량이 155[MVA]이다. 전원 측에 24[MVAR]의 캐패시터 뱅크가 있고, 집중부하 48[MVA], 역률 85%가 있다. 배전 변압기는 용량이 2[MVA]이고, 22.9[kV]전

압을 380[V]로 낮추어 부하에 공급하고 있다. 부하에는 역률 개선용 캐패시터 뱅크 500[kVAR], 집중부하 800[kVA], 역률 77%가 있고, 고조파 발생원으로 가변 주파수 교류 구동장치(Variable Frequency AC Drive, VFD) 500[kVA], 역률 75%가 있다. 전력회사에서 캐패시터 뱅크를 투입하면, 초기에는 과도 전류에 의해 전압이 낮아지게 된다. 전압이 정상치로 돌아가면서 최대값 보다도 더 올라가게 되는데 200[%]까지 올라 갈 수도 있다. 몇 주기의 동요가 일어난 후 전압은 안정을 찾게 된다. 과도 전압의 주파수는 비교적 작은 200[Hz]에서 1.5[kHz]사이 이다. [1][2][3] 과도 전압의 크기, 지속시간, 주파수는 부하 램핑, 시스템 인덕턴스, 시스템과 동조를 일으키는 조건 등 여러 가지 요소에 따라 다르다. 전력회사측과 부하측의 임피던스가 공진 주파수에 동조가 되면 부하 측에 과도 전압이 증폭되어 더욱 커진다.

2.2 등가변환

전력계통의 전자과도 현상을 분석하기 위해서는 적절한 모델로 변환하여야 한다[3]. 실제계의 전력시스템은 여러 계급의 전압으로 이루어져 있고, 선로정

수 또한 불평형으로 3상으로 해석해야 하나 편의상 평형 3상으로 취급하여 단상으로 등가회로화 시킨다. 모든 단위는 백분율로 환산한 값을 쓴다. 부하에 전력을 공급하는 변전소를 전압원으로 나타낸다.

전압원은 크기(Volts), 위상(Phase), 주파수(Hertz)로 표현한다. 인덕턴스(Henry)는 초기조건으로 초기 전류크기(Amperes), 초기전류 위상값(Degrees)이 필요하다. 스위치는 투입하거나 개방할 때 필요한 소자로 쓰인다. 스위치 소자의 상태가 개방인지, 투입인지를 파악하고, 투입이나 개방시간(msec)이 입력으로 쓰인다.

부하는 저항 R[Ohms]과 리액턴스 X_L [Ohms]가 병렬로 연결된 임피던스로 등가화시킨다. 부하전압 V[kV], 부하전력 S[MVA], 부하역률 $\cos \theta$ 가 주어지면, 부하 임피던스는 다음과 같이 계산한다.

$$Z = \frac{V^2}{S} \text{ [Ohms]} \quad (1)$$

$$R = Z \cdot \cos \theta \text{ [Ohms]} \quad (2)$$

$$X_L = Z \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \text{ [Ohms]} \quad (3)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \text{ [Henry]} \quad (4)$$

여기서 f =주파수[Hz], Z =임피던스[Ohms], R =저항[Ohms], X_L =유도성 리액턴스[Ohms], L =인덕턴스[Henry]이다.

캐패시터 뱅크는 전압 V[kV], 용량 Q[MVAR]이 주어지면, 캐패시터는 다음과 같이 구한다.

$$X_C = \frac{V^2}{Q} \text{ [Ohms]} \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \text{ [Farad]} \quad (6)$$

여기서 X_C =용량성 리액턴스[Ohms], C =캐패시터 [Farad]이다.

변압기 모델은 간소화 된 것으로 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 임피던스로 나타낸다. 그림 2는 단상으로 등가변환 시킨 회로도로서 A는 전력회사 공급전원의 node, C는 전력회사측의 node 이고 H는 부하측의 node 이다.

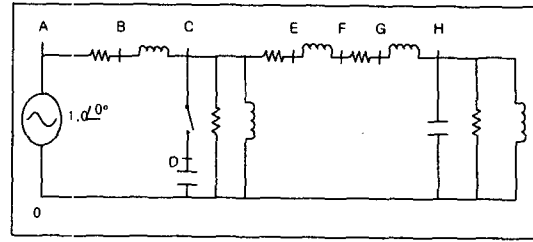


그림 2. 단상 등가변환 회로도
Fig 2. System Equivalent Diagram

각 소자는 다음과 같이 구하면 된다. 먼저 백분율로 하기 위하여 기준을 설정한다.

$$S_b = 10 \text{ [MVA]}$$

$$V_{bs} = 22.9 \text{ [kV]}$$

$$V_{bl} = 380 \text{ V} = 0.38 \text{ [kV]}$$

$$Z_{bs} = \frac{(V_{bs})^2}{S_b} = 52.441 \text{ [Ohms]}$$

$$Z_{bl} = \frac{(V_{bl})^2}{S_b} = 0.0144 \text{ [Ohms]}$$

전력회사측의 데이터를 구한다.

$$V_{A0} = 22.9 \text{ [kV]} = 1.0 \angle 0^\circ \text{ [pu]}$$

$$Z_A = \frac{22.9^2}{155} = 0.3383 \text{ [Ohms]}$$

$$Z_A = \frac{Z_A}{Z_{bs}} = 0.00645 \text{ [pu]}$$

$$R_{AB} = 0.00053 \text{ [pu]}$$

$$X_{BC} = 0.00643 \text{ [pu]}$$

$$L_{BC} = \frac{X_{BC}}{377} = 0.000017 \text{ [pu]}$$

전력회사의 캐패시터 데이터를 구한다.

$$X_{D0} = \frac{22.9^2}{24} = 28.85 \text{ [Ohms]}$$

$$X_{D0} = \frac{X_{D0}}{Z_{bs}} = 0.41667 \text{ [pu]}$$

$$C_{D0} = \frac{1}{377 \times X_{D0}} = 0.00637 \text{ [pu]}$$

전력회사의 부하 임피던스를 구한다.

$$Z_c = \frac{22.9^2}{48} = 10.93[\text{Ohms}]$$

$$R_{CO} = Z_c \times 0.85 = 12.85[\text{Ohms}]$$

$$X_{CO} = Z_c \times \sqrt{1 - 0.85^2} = 20.74[\text{Ohms}]$$

$$R_{CO} = \frac{R_{CO}}{Z_{bs}} = 0.245[\text{pu}]$$

$$X_{CO} = \frac{X_{CO}}{Z_{bs}} = 0.395[\text{pu}]$$

$$L_{CO} = \frac{X_{CO}}{377} = 0.00104[\text{pu}]$$

전력회사와 부하사이의 선로 임피던스를 구한다.

$$R_{CE} = 0.3924[\text{Ohms}]$$

$$X_{EF} = 0.508[\text{Ohms}]$$

$$R_{CE} = \frac{R_{CE}}{Z_{bs}} = 0.007480[\text{pu}]$$

$$X_{EF} = \frac{X_{EF}}{Z_{bs}} = 0.009687[\text{pu}]$$

$$L_{EF} = \frac{X_{EF}}{377} = 0.000025[\text{pu}]$$

변압기의 임피던스를 구한다.

$$Z_{old} = 0.0574[\text{pu}]$$

$$Z_{new} = Z_{old} \times \frac{10}{2.0} = 0.287[\text{pu}]$$

$$R_{FG} = 0.0593[\text{pu}]$$

$$X_{GH} = 0.378[\text{pu}]$$

$$L_{GH} = \frac{X_{GH}}{377} = 0.001[\text{pu}]$$

부하의 캐패시터 데이터를 구한다.

$$X_{HO} = \frac{0.38^2}{0.5} = 0.2888[\text{Ohms}]$$

$$X_{HO} = \frac{X_{HO}}{Z_{bl}} = 20.05[\text{pu}]$$

$$C_{HO} = \frac{1}{377 \times X_{HO}} = 0.000132[\text{pu}]$$

부하의 임피던스를 구한다.

$$Z_H = \frac{0.38^2}{0.8} = 0.1805[\text{Ohms}]$$

$$R_{HO} = Z_h \times 0.77 = 0.2344[\text{Ohms}]$$

$$X_{HO} = Z_H \times \sqrt{1 - 0.77^2} = 0.2829[\text{Ohms}]$$

$$R_{HO} = \frac{R_{HO}}{Z_{bl}} = 16.278[\text{pu}]$$

$$X_{HO} = \frac{X_{HO}}{Z_{bl}} = 19.60778[\text{pu}]$$

$$L_{HO} = \frac{X_{HO}}{377} = 0.0521[\text{pu}]$$

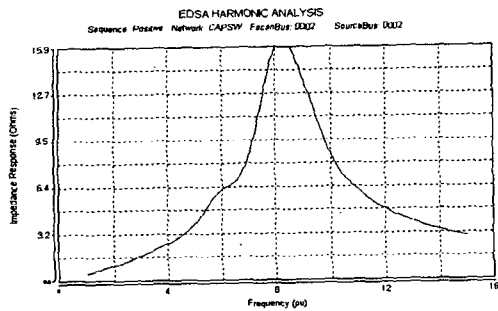
표 1은 그림 2의 등가회로소자의 값을 간추려 놓았다.

표 1. 등가변환회로의 입력 데이터
Table 1. Input Data for Equivalent System

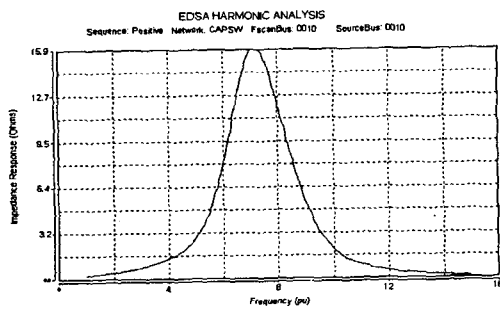
Component	Value[pu]
공급전원 (V _{AO})	1.0
전원측 단락저항 (R _{AB})	0.00053
전원측 단락리액턴스 (L _{BC})	0.000017
전력회사의 부하 캐패시턴스 (C _{DO})	0.00637
전력회사의 부하리액턴스 (L _{CO})	0.00104
전력회사의 부하저항 (R _{CO})	0.245
선로저항 (R _{CE})	0.00748
선로리액턴스 (L _{EF})	0.000025
변압기저항 (R _{FG})	0.0593
변압기리액턴스 (L _{GH})	0.001
부하저항 (R _{HO})	16.278
부하 리액턴스 (L _{HO})	0.0521
부하 캐패시턴스 (C _{HO})	0.000132

2.3 임피던스 응답특성

리액터 설치전의 전력회사와 부하측의 임피던스 응답곡선은 그림 3에 보여 주고 있다. 전력회사의 공진 주파수는 약 8고조파이고, 부하측의 공진 주파수는 약 7고조파이다. 두 지점의 공진 주파수가 비슷하기 하기 때문에 병렬 공진으로 인해 부하측에 더 큰 과도전압이 발생하게 된다.



(a) Utility at Bus 2



(b) Customer at Bus 9

그림 3. 임피던스 응답곡선
Fig 3. Impedance Response

2.4 과도전압, 전류 분석

60[Hz] 정현파의 전압이 전력회사의 전원으로 공급된다고 가정하고, 커패시터 스위치(그림2의 C와 D 사이에 위치)를 전압이 최고값에 도달하는 시간(4/60 = 0.0042 sec)에 투입하여 가장 나쁜조건으로 하여 전력회사와 부하측의 전압파형을 관찰한다. 그림 4는 전원측의 캐패시터 뱅크 투입시 전원측과 부하측의 전압 파형이다. 전력회사측은 최대치가 약 1.6[pu]인데 비하여 부하측은 최대치가 약 1.8[pu]가 되고 동요주기도 더 길게 일어나는 것을 보여 주고 있다.

동조가 일어나지 않도록 부하측 캐패시터에 직렬로 리액터를 설치한다. 전력회사측의 공진주파수가 약 8고조파인 관계로 공진을 벗어나게 부하측의 공진 주파수를 8고조파의 1/2인 4고조파로 선정한다. 또한 본 논문의 사례연구시스템 같이 고조파 발생원이 제 5고조파 성분을 많이 가지고 있는 경우에는 5고조파 제거 동조필터의 역할도 할 수 있도록 하되, 과도전압을 억제하는데 가중치를 더 두어 4.3공진주파

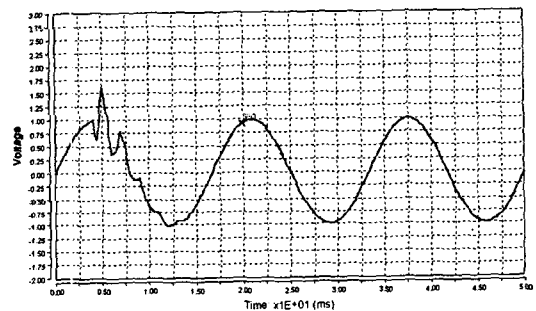
수로 적정한 직렬 리액터를 선정하기로 한다. 적정 리액터 선정 알고리즘을 간략히 설명하면 다음과 같다.

1. 시스템과 부하의 병렬 공진이 일어나지 않도록 한다.
2. 부하의 고조파 발생원의 성분을 제거하는 동조 필터가 되도록 한다.
3. 1,2항목에 가중치를 두어 적정 직렬리액터를 선정한다.

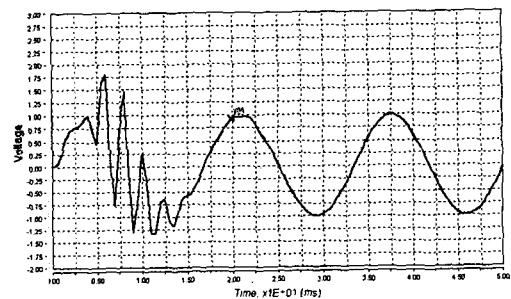
$$4.3 = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 L_h C_{ho}}}$$

$$L_h = \frac{1}{4.3^2 \times 377^2 \times C_{ho}} = 0.00288[\mu]$$

으로 구하여, 콘덴서에 직렬로 설치한다.

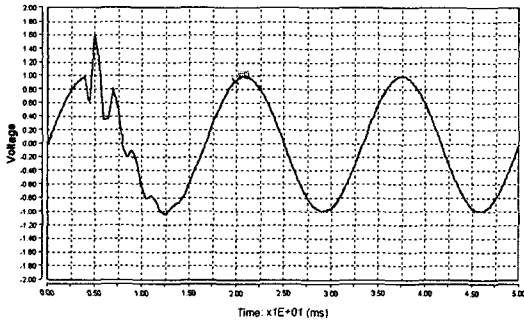


(a) Utility Voltage at Bus 2

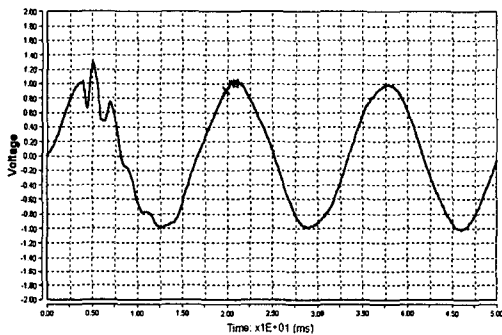


(b) Customer Voltage at Bus 9

그림 4. 리액터 설치 전 전압파형
Fig. 4. The Voltage Waveform without the Reactor



(a) Utility Voltage at Bus 2



(b) Customer Voltage at Bus 9

그림 5. 리액터 설치후 전압파형
Fig. 5. The Voltage Waveform with the Reactor

그림 4와 그림 5는 콘덴서에 직렬로 리액터 설치 후의 전압파형이다. 전력회사측의 최대전압은 1.6[pu]인데 비하여 부하측의 최대전압이 1.5[pu]로 줄어드는 것을 알 수 있다.

2.5 고조파 분석

EDSA의 고조파 분석 프로그램[4]으로 고조파 저감효과를 알아보기 위하여 부하측에 500[kVA], 역률 75[%]인 VFD를 설치하였다. 그림 6은 고조파 발생 원인 VFD의 전류 파형과 고조파 성분 그래프이다. 전류왜형률은 31.5[%]이고, 주로 5(28.83[%]), 7(8.76[%]), 11(6.73[%])고조파로 이루어져 있다. 전력계통에서 고조파문제의 측정기준은 왜형률로 나타낸다. 즉, 전압과 전류왜형률 (Total Harmonic Distortion, THD)은 다음과 같다[5].

$$\text{전압왜형률 } V_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (7)$$

$$\text{전류왜형률 } I_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (8)$$

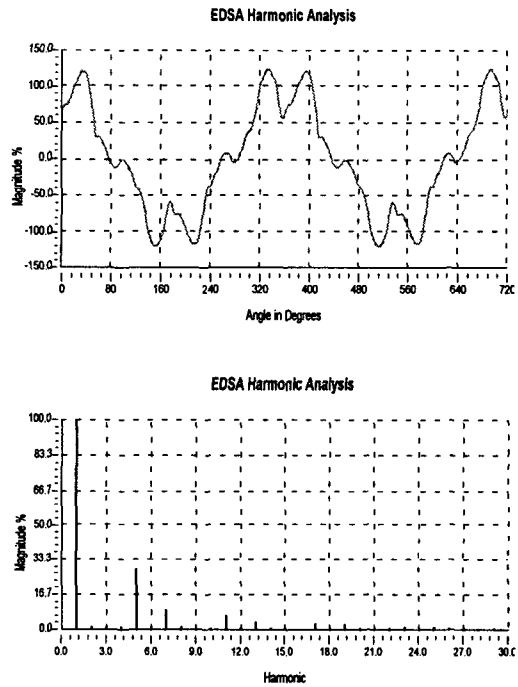
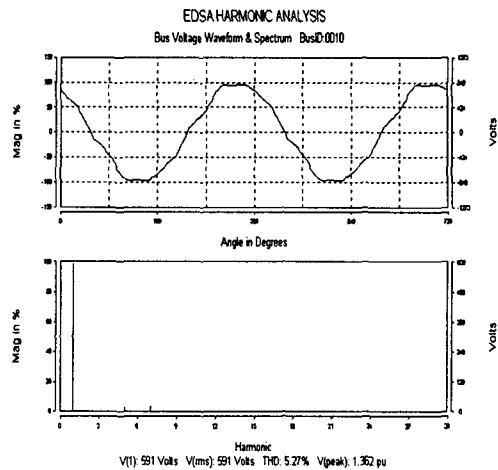
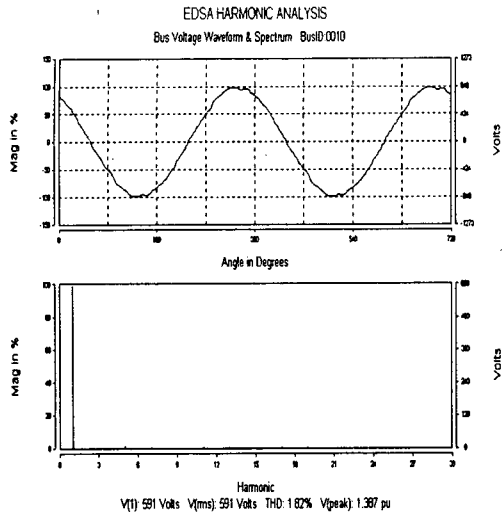


그림 6. 모선 9와 모선 17사이의 VFD 전류 파형
Fig. 6. VFD Current Waveform between Bus 9 and Bus 17



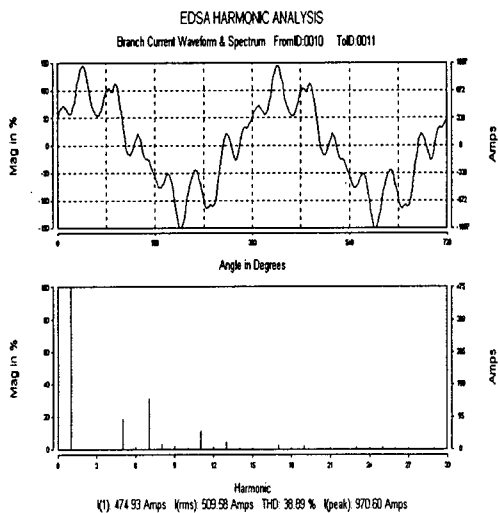
(a) Without the Reactor



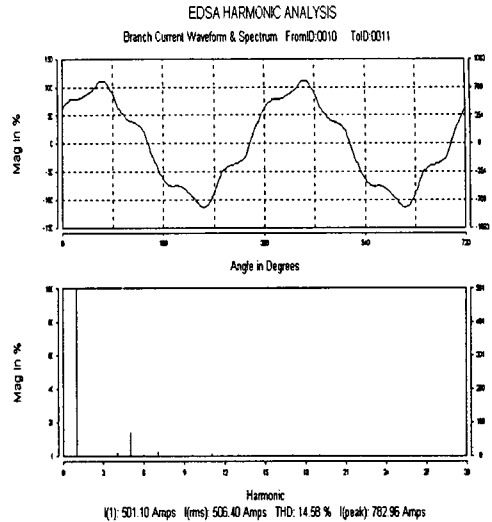
(b)With the Reactor

그림 7. 부하측 모선 9의 전압
Fig. 7. Bus 9 Voltage Waveform at Customer

콘덴서용 직렬 리액터 설치 전후의 고조파 전압과 전류를 그림 7과 그림 8에 비교하였다. 고조파 전압은 리액터 설치 전에는 왜형률이 5.27[%]에서 1.82[%]로 개선된 것을 알 수 있다. 고조파 전류는 리액터 설치 전에는 38.89[%]에서, 리액터설치 후에는 14.58[%]로 개선된 것을 알 수 있다. 리액터가 4.3고조파 성분을 제거하기 위한 필터 역할을 했기 때문이다.



(a)Without the Reactor



(b)With the Reactor

그림 8. 부하측 모선 2와 모선 9사이의 선로 전류
Fig. 8. Current Waveform at Customer Branch between Bus 2 and Bus 9

3. 결 론

전력계통에서 전자과도 현상은 주로 캐패시터 스위칭으로 인한 것이다. 캐패시터 뱅크는 전력회사에서 전압의 조정과 무효전력을 공급하기 위해서 필요한 장비이므로, 캐패시터 스위칭은 필연적이다. 현재 대부분의 전력설비를 보면 전압조정과 역률을 높이기 위해서 관례적으로 캐패시터 뱅크를 설치 운영하고 있다. 이것은 사례연구에서 보듯이 전력회사의 캐패시터 스위칭시 과도전압과 동요주기가 길어져 전력변환 장치 등 각종 전기설비에 장해를 주게 된다. 이를 개선하기 위한 방법으로 캐패시터 뱅크에 직렬로 리액터를 설치한다. 배전시스템과 부하간에 병렬 공진이 일어나지 않도록 적절한 리액터 값을 산정해야 한다.

사례연구에서는 8고조파 공진을 피하기 위해서 부하측의 캐패시터 뱅크에 리액터를 설치하여 4.3고조파로 부하임피던스가 되게 하였다. 그 결과 캐패시터 스위칭시 전압의 최대치가 1.8[pu]에서 1.5[pu]으로 낮아지고 동요주기도 줄일 수 있었다.

콘덴서용 직렬 리액터가 고조파 저감효과도 가져온다는 것을 사례연구에서 알아보았다. 리액터 설치시 부하측의 전압 왜형률이 5.27[%]에서 1.82[%]로 개

선되고, 선로 전로의 왜형률은 38.89[%]에서 14.58[%]로 저감되었다.

References

- (1) R. C. Dugan, m. F. McGranahan, H. W. Beaty, "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill Co., 1996.
- (2) P. Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power System", John Wiley & Sons Inc., 1996.
- (3) EDSA user's Guide, "Electromagnetic Transient Analysis Program", EDSA Micro Co., 1998.
- (4) EDSA user's Guide, "Electrical Power Systems Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co., 2000.
- (5) "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.