

순시보상전류의 공간 벡터 검출법에 의한 3상 능동 직렬형 전압강하 보상기

조재연*^o 정영국** 김정근** 임영철*

*전남대학교 전기공학과 **대불대학교 전기공학과

Three Phase Active Series Voltage Compensator by Space Vector Detecting Method

*^oJae-Yun Cho **Young-Gook Jung **Jung-Kun Kim *Young-Cheol Lim

*Chonnam National University **Daebul University

ABSTRACT

본 연구에서는 3상 능동 직렬형 전압 보상기의 제어 알고리즘으로 공간 벡터 검출법(3-D SV)을 제안하고 있다. 제안된 3차원 공간 벡터법은 종전의 순시 전력이론에 의한 방법에 비해 보상 기준치 연산과정을 간략화 할 수 있고 좌표변환이 필요치 않다. 제안된 알고리즘은 전원전압의 순간적인 sag가 발생되더라도 비선형 부하에 인가되는 전압은 일정한 정현파로 제어 가능하며 동시에 전원전류의 고조파와 기본파 무효전류도 보상 가능하다. 정상상태와 과도상태에서 전력전자전용 시뮬레이터인 PSIM에 의해 제안된 이론의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

비선형 부하의 고조파 문제는 일반적으로 능동전력 필터 시스템[1]에 의하여 보상 가능하고, 전원전압의 왜형과 전압변동은 무정전 전원장치(UPS)[2] 또는 직렬형 능동전력필터[3]로 해결하고 있다. 이상의 고조파와 전원전압 강하보상의 문제는 대부분 별개로 인식되어져 왔고 그 해결 방안 역시 각기 별도의 보상 장치에 의하여 수행되어져 왔다. 이는 보상장치의 활용도 저하와 비용의 증가를 유발시키는 원인이 되고 있다.

최근의 전력품질 문제는 적절한 보상 알고리즘에 의해 1대의 전력전자 변환기로 전원전압 변동과 전류 고조파를 종합적으로 해결하여 변환기의 사용률을 극대화해야 하는데 주안점이 있다. 순시전력이론[4], 동기좌표계 이론[5]은 이를 위한 보상 알고리즘으로 유력시되고 있다. 그러나 순시전력이론은 보상기준치 연산과정에 12회의 곱셈과 나눗셈 연산이 필요하게 되며, 동기 좌표계 이론은 8회의 곱셈과정과 PLL(Phase Locked Loop) 및 정현파 발생회로가 요구된다. 아날로그 회로에 의해서 이상의 알고리즘을 구현하는 경우, 제어회로의 성능에 영향을 주지 않는 범위내에서

곱셈기 등과 같은 아날로그 회로의 간략화는 전체 제어기의 가격 저하에 필수적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 3상 능동 직렬형 전압 보상기의 제어 알고리즘으로 공간 벡터 검출법을 제안하고 있다. 제안된 3차원 공간 벡터법(3-D SV)은 종전의 순시전력이론에 의한 방법에 비해 보상 기준치 연산과정을 간략화 할 수 있고 좌표변환이 필요치 않다. 제안된 알고리즘은 전원전압의 순간적인 sag가 발생되더라도 비선형 부하에 인가되는 전압은 일정한 정현파로 제어 가능하며 동시에 전원전류의 고조파와 기본파 무효전류도 보상 가능하다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 전력전자전용 시뮬레이터인 PSIM에 의해 종전의 순시전력이론과 제안된 이론을 비교 검토하였다.

2. 이 론

2.1 3차원 공간 벡터와 순시전력

3차원 변수 x_a, x_b, x_c 는 2차원 park 벡터에 의해 (1)로 표현되며,

$$\vec{x} = x_a + x_b e^{-j120^\circ} + x_c e^{j120^\circ} \quad (1)$$

x-y-z축의 단위벡터(unit vector) $\vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$ 에 의해 3차원 공간상에서는 (2)와 같이 나타내진다.

$$\vec{x} = x_a \vec{a}_x + x_b \vec{a}_y + x_c \vec{a}_z \quad (2)$$

순시전압공간 벡터 \vec{e} 와 순시전류공간 벡터 \vec{i} 를 (2)와 동일한 형태로 나타내면

$$\vec{e} = e_a \vec{a}_x + e_b \vec{a}_y + e_c \vec{a}_z \quad (3)$$

$$\vec{i} = i_a \vec{a}_x + i_b \vec{a}_y + i_c \vec{a}_z \quad (4)$$

여기서 e_a, e_b, e_c 와 i_a, i_b, i_c 는 각각 3상 전압과 전류를 나타내며 다음과 같다.

$$e_a = \sqrt{2}E_1 \sin \omega t$$

$$e_b = \sqrt{2}E_1 \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi)$$

$$e_c = \sqrt{2}E_1 \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi)$$

$$i_a = \sum_n \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \phi_n)$$

$$i_b = \sum_n \sqrt{2}I_n \sin[n(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - \phi_n]$$

$$i_c = \sum_n \sqrt{2}I_n \sin[n(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - \phi_n]$$

순시전압공간 벡터 \vec{e} 와 순시전류공간 벡터 \vec{i} 사이의 각도를 θ 라 할 때, 이들의 스칼라 곱은 3상 순시유효전력벡터이며, 벡터 곱은 3상 순시무효전력 벡터가 된다.

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (7)$$

$$\vec{q} = \vec{e} \times \vec{i} \quad (8)$$

$$= (e_b i_c - e_c i_b) \vec{a}_x + (e_c i_a - e_a i_c) \vec{a}_y + (e_a i_b - e_b i_a) \vec{a}_z \quad (9)$$

그림 1에서 보는 바와 같이 \vec{q} 는 $e-i$ 평면과 직각이며, \vec{i} 벡터는 다음과 같이 \vec{i}_p 와 \vec{i}_q 2성분의 합이다.

$$\vec{i} = \vec{i}_p + \vec{i}_q \quad (10)$$

여기서 \vec{i}_p 는 \vec{e} 벡터와 평행인 순시유효전류 벡터이며, \vec{i}_q 는 \vec{e} 벡터와 직각인 순시무효전류 벡터이다.

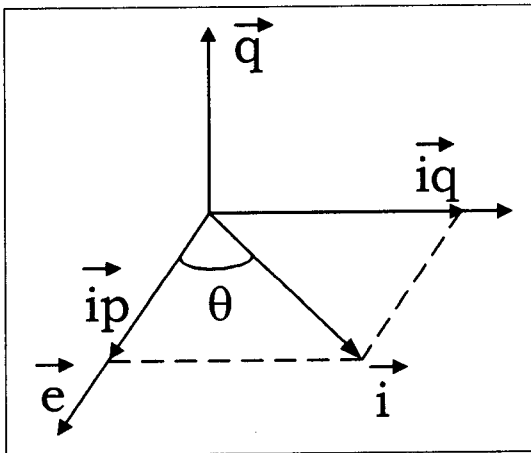


그림 1 순시전압과 전류 공간 벡터의 표현
Fig. 1 Representation of instantaneous voltage and current space vector

전압벡터 \vec{e} 와 유효전류 벡터 \vec{i}_p 가 동일한 방향일 때, 3상 순시유효전력은 다음과 같다.

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} = \vec{e} \cdot (\vec{i}_p + \vec{i}_q) = \vec{e} \cdot \vec{i}_p \quad (11)$$

$$= |\vec{e}| |\vec{i}_p| \cos 0^\circ = |\vec{e}| |\vec{i}_p| \quad (12)$$

$$|\vec{i}_p| = \frac{p}{|\vec{e}|} = \frac{p}{|\vec{e}|} \frac{|\vec{e}|}{|\vec{e}|} = \frac{p}{\vec{e} \cdot \vec{e}} \quad (13)$$

전압벡터 \vec{e} 와 유효전류 벡터 \vec{i}_p 가 동일한 방향이므로, \vec{i}_p 는 (14)로 된다.

$$\vec{i}_p = \frac{p \vec{e}}{\vec{e} \cdot \vec{e}} \quad (14)$$

한편 전압벡터 \vec{e} 와 유효전류 벡터 \vec{i}_q 가 반대 방향인 경우에는, 3상 순시유효전력은 다음과 같이 표현된다.

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} = \vec{e} \cdot (\vec{i}_p + \vec{i}_q) = \vec{e} \cdot \vec{i}_p \quad (15)$$

$$= |\vec{e}| |\vec{i}_p| \cos 180^\circ = -|\vec{e}| |\vec{i}_p| \quad (16)$$

$$|\vec{i}_p| = \frac{-p}{|\vec{e}|} = \frac{-p}{|\vec{e}|} \frac{|\vec{e}|}{|\vec{e}|} = \frac{-p}{\vec{e} \cdot \vec{e}} \quad (17)$$

전압벡터 \vec{e} 와 유효전류 벡터 \vec{i}_q 가 반대 방향이므로, 순시유효전류 벡터는 (18)로 구해진다.

$$\vec{i}_p = \frac{-p(-\vec{e})}{\vec{e} \cdot \vec{e}} = \frac{p \vec{e}}{\vec{e} \cdot \vec{e}} \quad (18)$$

(7)과 (8)의 p와 q는 다음과 같이 직류(기본파)성분 \bar{p} , \bar{q} 과 교류(왜형)성분 \tilde{p} , \tilde{q} 로 구성되어 있으며

$$\bar{p} = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$\bar{q} = \bar{q} + \tilde{q} \quad (19)$$

이로부터 순시 기본파 유효전류의 공간벡터는 다음과 같이 된다.

$$\vec{i}_p = \frac{\bar{p} \vec{e}}{\vec{e} \cdot \vec{e}} \quad (20)$$

결국 순시보상전류의 공간벡터 \vec{i}_h 는 다음 식과 같게 된다

$$\vec{i}_h = \vec{i} - \vec{i}_p \quad (21)$$

$$= \vec{i} - \frac{\bar{p}(e_a \vec{a}_x + e_b \vec{a}_y + e_c \vec{a}_z)}{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2} \quad (22)$$

여기서 \vec{i} 은 부하전류의 공간벡터이고 다음과 같다.

$$\vec{i} = i_a \vec{a}_x + i_b \vec{a}_y + i_c \vec{a}_z \quad (23)$$

3상 3선 시스템의 경우, $e_a + e_b + e_c = 0$ 이며 보상전류는 다음으로 표현된다.

$$i_{ha} = i_a - \frac{\bar{p} e_a}{2[(e_a + e_b)^2 - e_a e_b]} \quad (24)$$

$$i_{hb} = i_b - \frac{\bar{p} e_b}{2[(e_a + e_b)^2 - e_a e_b]} \quad (25)$$

$$i_{ch} = i_c - \frac{\overline{pe_c}}{2[(e_a + e_b)^2 - e_a e_b]} \quad (26)$$

그림 2은 (7)과 (24)~(26)에 기본을 둔 순시 왜형전류를 검출하기 위한 블록선도이다. 그림2에서 보는 바와 같이 제안된 방법은 보상기준치 연산시 종전의 방법과 비교하여 좌표변환과 PLL등의 부가적인 회로가 필요하지 않으며, 8회의 곱셈연산 과정으로 보상 기준치를 구할 수 있다.

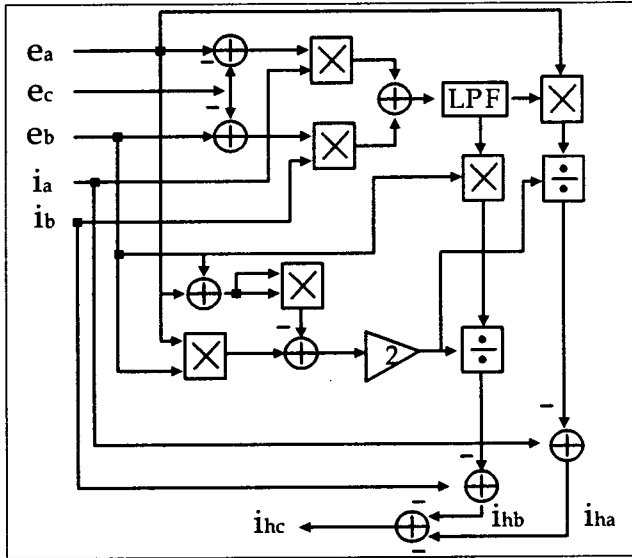


그림 2 보상 기준치의 공간벡터 검출법(3-D SV)의 블록선도
Fig. 2 Block diagram for detecting compensation reference by space vector method(3-D SV)

2.2 시스템 구성

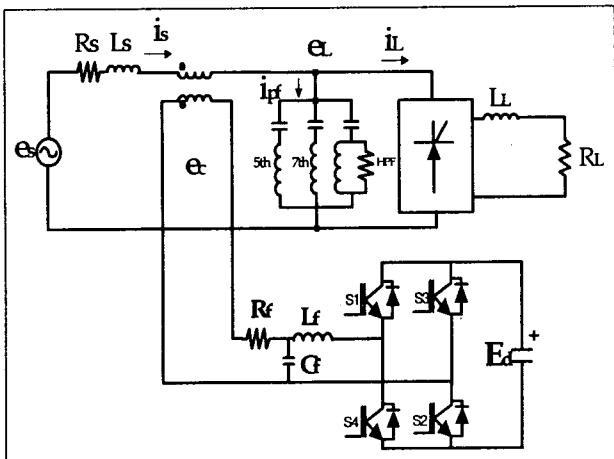


그림 3 3상 능동 직렬형 전압보상기의 단상분 등가회로
Fig. 3 Per phase equivalent circuit of three phase active series voltage compensator

그림 3은 본 연구의 3상 능동 직렬형 전압보상기의 시스템 구성을 보여주고 있다. 직렬형 능동전력필터는 고

조파 전류를 저지하여 계통과의 절연과 전원전압의 변동분을 보상하여 부하단의 전압을 일정하게 유지시켜준다. 또한 수동필터는 저 임피던스 회로로 동작하여 부하 고조파 전류를 흡수하고 있다.

그림 4는 3상 계통에 공간벡터 검출법을 적용하여 고조파 전류와 전원 전압의 순간적인 변동을 동시에 보상하기 위한 블록선도를 나타내고 있다.

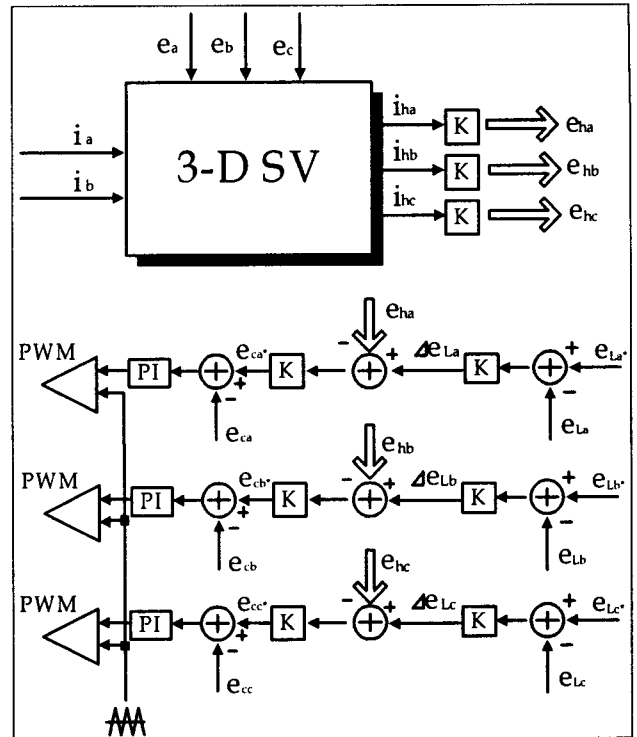


그림 4 전체 시스템의 제어 블록선도
Fig. 4 Control block diagram of overall system

(24)~(26)으로 구해진 보상기준 고조파 전류 $i_h(abc)$ 에 대한 보상전압 $e_h(abc)$ 는 다음과 같다.

$$e_h(abc) = K_h i_h(abc) \quad (27)$$

또한 전원전압의 순간적인 변동과 왜형에 대한 보상전압 $\Delta e_{L(abc)}$ 은 기준부하 전압 $e_{L(abc)*}$ 과 검출된 부하전압 $e_{L(abc)}$ 과의 차로 구해진다.

$$\Delta e_{L(abc)} = e_{L(abc)*} - e_{L(abc)} \quad (28)$$

전압 변동분 $\Delta e_{L(abc)}$ 과 고조파 전류 보상분 $e_h(abc)$ 를 동시에 직렬형 능동전력필터가 보상하기 위한 최종적인 보상전압은 (29)와 같다.

$$e_{c(abc)*} = \Delta e_{L(abc)} - e_h(abc) \quad (29)$$

3. 시뮬레이션 모델링

그림 5는 본 연구에서 제안된 3-D SV 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 전력전자전용 PSIM 시뮬레

이터에 의해 제안된 시스템을 모델링한 것을 나타내고 있으며, 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 보여주고 있다.

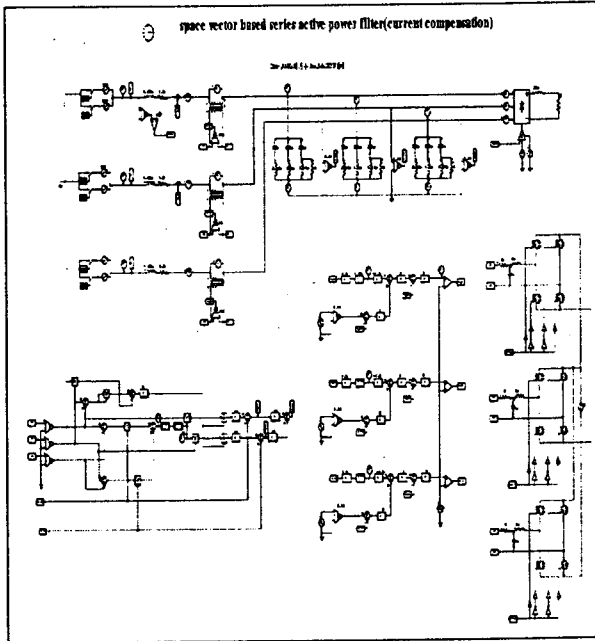


그림 5 3-D SV의 PSIM 시뮬레이션 모델링
Fig. 5 PSIM simulation Modeling for the 3-D SV

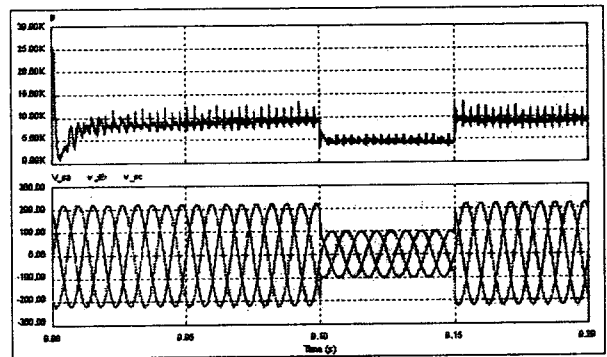
보상장치는 3상 전압원 직렬형 능동전력필터를 사용하고 있고, 삼각파 비교방식 10KHz PWM 변조기를 이용하였다. 직렬형 능동전력필터의 직류단 캐패시터는 직류 정전압원으로 하였으며 비선형 부하는 점호각 변동에 의해서 직류전류가 제어되는 전류형 사이리스터 제어 정류기이다. 3상 전원전압의 순간적인 Sag는 PSIM에서 제공하는 타이머와 릴레이를 이용하여 발생시켰다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System Parameters

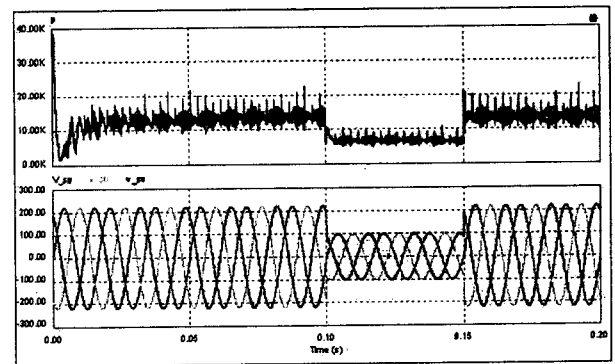
Source voltage/current	220V/60Hz, 40A
Source impedance	$R_s=0.5\Omega$ $L_s=0.05mH$
Passive filter	5th $C=102\mu F$ $L=3.96mH$
	7th $C=170\mu F$ $L=1.2mH$
	HPF $C=300\mu F$ $L=0.26mH$ R
L-C filter	$R_f=0.5\Omega$ $L_f=1mH$ $C_f=$
d.c voltage	$E_d=600V$
Load impedance	$L_L=30mH$ $R_L=6\Omega$
PWM frequency	10KHz
K_h	4

4. 결과 및 고찰

3상 220V의 정현파 전원 전압이 순간적으로 100V로 강하된 경우, 순시전력이론과 제안된 3-D SV에 의해 순시유효전력 p 를 연산한 결과를 그림6에 나타내었다. 그림6을 살펴보면 전원전압의 강하 기간동안 순시유효전력 p 가 감소됨을 알 수 있다. 또한 제안된 방식의 p 는 순시전력이론의 경우와 비교하여 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) Instantaneous power theory



(b) The proposed 3-D SV

그림 6 순시유효전력 p
Fig. 6 Instantaneous active power p

그림 7은 3상 모두 sag가 발생한 전원전압을 제안된 3-D SV에 의해서 보상한 결과이다. 그림7(a)에서 보는 바와 같이 제안된 능동형 직렬 전압 보상기에 의하여 전원전압에 sag가 발생되더라도 비선형 부하에는 전원전압의 조건과 무관하게 항상 일정한 정현파 전압이 공급되고 있다. 그림7(b)와 그림8은 전원전압의 sag가 발생한 경우, 전원전류의 고조파 성분을 보상한 결과이다. 보상 후의 전원전류는 3상이 모두 정현파로 되고, FFT 분석결과를 살펴보면 고조파가 양호하게 제거되고 있음을 알 수 있다.

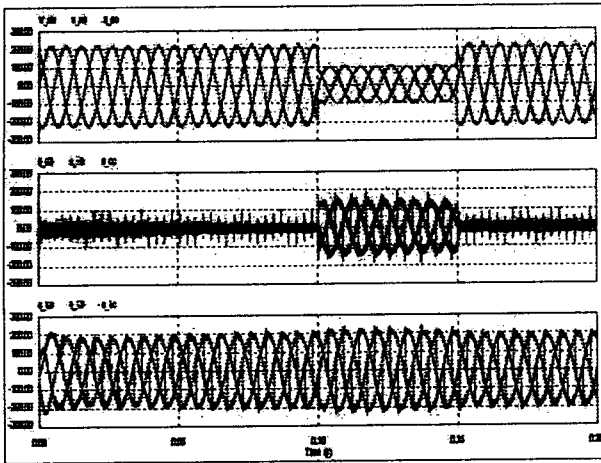
5. 결 론

본 연구에서는 3상 능동 직렬형 전압 보상기의 제어 알고리즘으로 공간 벡터 검출법(3-D SV)을 제안하였다. 제안된 3차원 공간 벡터법은 중전의 순시전력 이론에 의한 방법에 비해 보상 기준치 연산과정을 간략화 할 수 있고 좌표변환이 필요치 않다. 제안된 알고리즘은 전원전압의 순간적인 sag가 발생되더라도 비선형 부하에 인가되는 전압은 일정한 정현파로 제어 가능하며 동시에 전원전류의 고조파와 기본파 무효전류도 보상 가능하다. 정상상태와 과도상태에서 전력전자전용 시뮬레이터인 PSIM에 의해 제안된 이론의 타당성을 입증하였다.

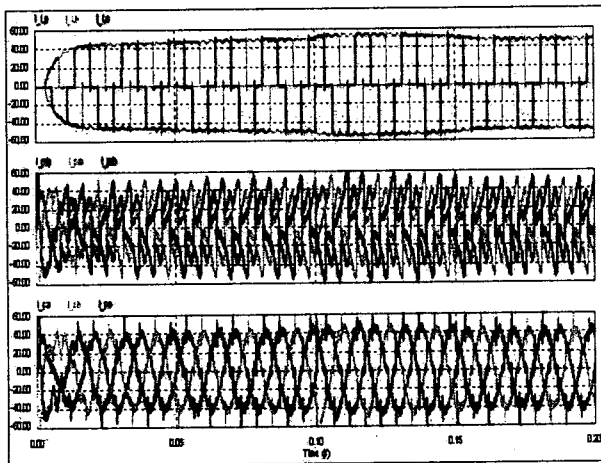
본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기 전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구된 결과의 일부임.

참 고 문 헌

- [1] Y.G.Jung, Y.C.Lim, S.H.Yang, "Single-Phase Active Power Filter based on Three-Dimensional Current Coordinates", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.147, no.6, November, pp. 572~578, 2000.
- [2] S.Silva, P.Cortizo, "A Three Phase Series Parallel Compensated Line Interactive UPS System with Sinusoidal Input Current and Sinusoidal Output Voltage", IEEE IAS, pp. 826~832, 1999.
- [3] V.B.Bhavaraju, "Analysis and Design of Active Power Filter for Balancing Unbalanced Loads", IEEE Trans., Power Electronics, Vol. 8, No. 4, pp. 640~647, 1993.
- [4] H.Akagi, H.Fujita, "Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage Source PWM Converter", IEEE Trans., IA-22, pp. 460~465, 1986.
- [5] G.Joos, "Three Phase Static Series Voltage Regulator Control Algorithms for Dynamic Sag Compensation", IEEE ISIE, pp. 515~520, 1999.



(a) Voltage(e_s, e_c, e_L)



(b) Current(i_L, i_P, i_S)

그림 7 순시전압sag 및 고조파전류 보상 결과(3-D SV)
Fig. 7 Compensation results of Instantaneous voltage sag and distorted current(3-D SV)

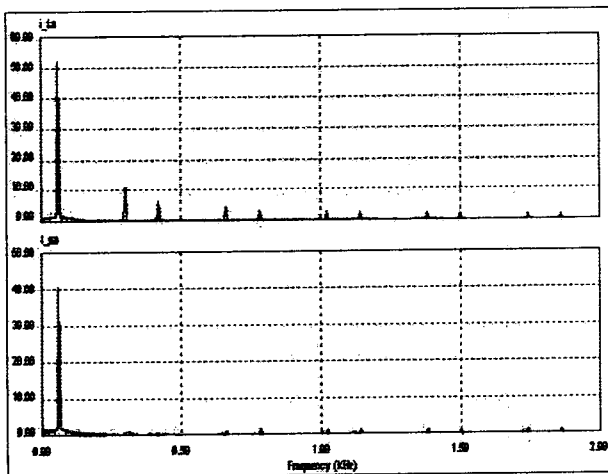


그림 8 전류 FFT 스펙트럼(i_L, i_S)

Fig. 8 Current FFT spectrum(i_L, i_S)