

## 확장된 3차원 전류 좌표계에 의한 능동전력필터의 보상성능 평가

김정근<sup>°</sup> 임영철<sup>°</sup> 정영국<sup>°</sup>  
 °전남대 전기공학과 "대불대 컴퓨터정보학부

### Compensating Performance Evaluation of Active Power Filters Using the Expanded 3-D Current Coordinates

J. G. Kim<sup>°</sup> Y. C. Lim<sup>°</sup> Y. G. Jung<sup>°</sup>  
 °Chonnam National University "Daebul University

**Abstract** - Conventional methods in time / frequency domain for evaluating the compensation performance of active power filters are not provided easy solutions. So, the authors have previously proposed 3-D current coordinates which is composed into active component, fundamental reactive component and distorted component of nonlinear loads current. This method has excellent performance, but can not evaluate the characteristics of nonlinear load current whether it is inductive or capacitive. Therefore, To overcome problems mentioned previously, this paper deals with the simple Average power theory and the expanded 3-D current coordinates for evaluating the compensation performance of active power filters. To confirm the validity, active power filters simulator is developed using C-language. From the simulation, results are discussed their utility.

### 1. 서 론

능동전력필터에 일반적으로 이용되고 있는 시간 영역과 주파수 영역에서의 보상성능 평가법[1-4]은 교류 전류의 유효 성분, 기본파 무효 성분, 왜형 성분들의 순시적 변화를 알 수 없고, 항상 두 영역의 평가가 동시에 존재하는 번거러움이 있다. 따라서 저자들은 능동전력필터의 보상성을 평가하는 방법으로 3차원 전류 좌표계 해석법[5-7]을 제시한 바 있다. 이 방법은 평가하고자 하는 교류 전류를 유효 성분, 기본파 무효 성분 그리고 왜형 성분 등 3 성분으로 분해하여 이를 기반으로 하여 3차원 전류 좌표계를 구성한 후, 각 전류성분의 존재량으로 능동전력필터의 보상 성능을 평가하는 방법이다. 그러나 이 방법은 유도성 부하전류와 용량성 부하전류를 모두 동일 공간상에 3차원적으로 나타내므로 보상 성능을 평가하기 위한 부하전류가 용량성인지 유도성인지 파악할 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 간단하게 전력을 분석할 수 있는 평균전력이론을 살펴보고, 유도성 부하 전류 및 용량성 부하 전류에도 모두 적용 가능한 확장된 3-D 전류 좌표계에 의한 능동전력필터의 보상성능 평가법을 제시하였다. C-언어기반으로 개발된 시뮬레이터에 의하여 제안된 방법의 타당성을 검증할 수 있었다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 평균전력이론

교류 전압  $v(t)$ 가 정현파라 하더라도, 교류 전류  $i(t)$ 는 전력전자기기의 비선형 특성으로 인해 왜형이 되며, 이때 전압과 전류의 실효치  $V$ ,  $I$  및 피상 전력  $S$ , 유효 전력  $P$ 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) v(t) dt} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) i(t) dt} \quad (2)$$

$$S = VI \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (4)$$

또한 기본파 무효 전력  $Q$ 는 식(5), 식(6)과 같이  $t = T/4$  주기( $90^\circ$ ) 만큼 이동한 교류 전압에 의해서 구해진다. 즉 유도성 부하인 경우, 기본파 무효 전력은 식(5)과 같이  $t = T/4$  주기( $+90^\circ$ )만큼 이동하여 교류 전류와 곱하면 되며, 용량성 부하인 경우는 식(6)과 같이  $t = -T/4$  주기( $-90^\circ$ ) 만큼 교류 전압을 이동하여 교류 전류를 곱하면 기본파 무효 전력이 구해진다.

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t - \frac{T}{4}) i(t) dt \quad [\text{유도성 부하}] \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t + \frac{T}{4}) i(t) dt \quad [\text{용량성 부하}] \quad (6)$$

전력의 각 성분들은, 서로 독립적이며 직교성이 유지되므로 왜형 전력  $D$ 는 식(7)로 구해진다.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (7)$$

이상의 분해된 전력 성분으로부터, 비선형 부하의 등가변수  $B$ ,  $G$ ,  $K$ 가 얻어진다.

$$B = \frac{Q}{V^2} \quad (8)$$

$$G = \frac{P}{V^2} \quad (9)$$

$$K = \frac{D}{V^2} \quad (10)$$

등가변수  $B$ ,  $G$ ,  $K$ 로 나타난 비선형 부하의 유효 전류 순시치  $i_a(t)$ 와 왜형 전류 순시치  $i_d(t)$ 는 각각 식(11)과 식(12)와 같으며

$$i_a(t) = Gv(t) \quad (11)$$

$$i_d(t) = Kv(t) \quad (12)$$

또한 유도성 부하의 기본파 무효 전류 순시치  $i_c(t)$ 는 식(13)과 같이, 교류 전압을  $t = T/4$  주기( $+90^\circ$ )만큼 이동하여  $B$ 를 곱하면 되고, 용량성 부하인 경우는 식(14)와 같이  $t = -T/4$  주기( $-90^\circ$ )만큼 교류 전압을 이동하여  $B$ 와 곱하면 구해진다

$$i_r(t) = B v(t - \frac{T}{4}) \quad [\text{유도성 부하}] \quad (13)$$

$$i_r(t) = B v(t + \frac{T}{4}) \quad [\text{용량성 부하}] \quad (14)$$

이들 전류 순시치 사이에는 식(15)와 같은 관계가 성립하며

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_d(t) \quad (15)$$

전류의 실효치는 식(16)-식(19)로 구해진다.

$$I_a = G V \quad (16)$$

$$I_r = B V \quad (17)$$

$$I_d = K V \quad (18)$$

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_d^2 \quad (19)$$

## 2.2. 확장된 3차원 전류 좌표계

능동전력필터에 일반적으로 사용되고 있는 시간 영역과 주파수 영역에서의 보상성능 평가법은 교류 전류의 유도성분, 기본파 무효 성분, 왜형 성분들의 순시적 변화를 알 수 없고, 항상 두 영역의 평가가 동시에 존재하는 번거러움이 있다. 이와 같은 능동전력필터의 보상성능 평가법을 개선하기 위하여 교류 전류를 유도 성분, 기본파 무효 성분 그리고 왜형 성분 등 3 성분으로 분해하여 이를 기반으로 하여, 보상 전후의 각 전류 성분의 존재량으로 평가하는 3차원 전류 좌표계가 제시되었다. 그림1은 종래의 3차원 전류 좌표계에 의한 평가법을 나타내고 있다.

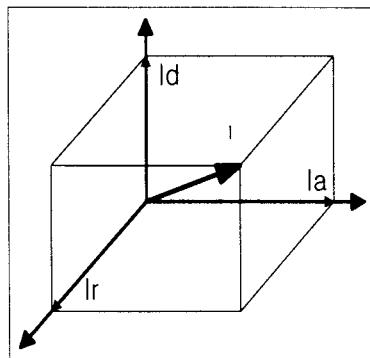


그림1 종래의 3차원 전류 좌표계

Fig.1 Conventional 3-D current coordinates

그림1에서 나타낸 바와 같이 용량성 및 유도성 부하 전류를 모두 한 공간 좌표계에 가시화 하므로 부하에 따른 전류 특성을 파악하기 불가능하다. 그러나 종래의 3차원 전류 좌표계의 기본파 무효 전류 좌표축을 유도성 전류 좌표축 +Ir로 나타내고, 유도성 전류 좌표축의 반대 좌표축을 용량성 전류 좌표축 -Ir로 표기하면 3차원 전류 좌표상에 유도성 부하 전류와 용량성 부하 전류를 모두 가시화 가능하게 된다. 물론 +Ir과 -Ir은 동시에 존재할 수 없기 때문에 부하 전류는 +Ir공간과 -Ir공간중의 어느 한 공간좌표에 있게 된다.

2.1절에서 언급한 평균전력이론은 유도성 기본파 무효 전류 뿐만 아니라 용량성도 모두 표현 가능하다. 따라서 용량성과 유도성 기본파 무효 전류를 모두 분석 가능한 평균전력이론에 의하여 종래의 3차원 전류 좌표계의 모호한 전류표현을 부하특성에 따라 확고하게 가시화 할 수 있도록 확장된 3차원 전류 좌표계를 그림2에 나타내었다.

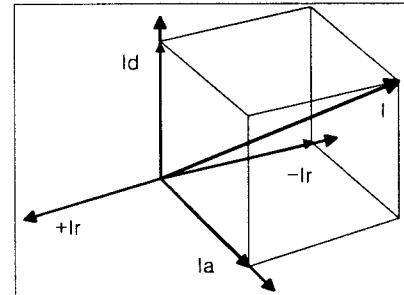


그림2 확장된 3차원 전류 좌표계

Fig.2 Expanded 3-D current coordinates

## 3. 시뮬레이션 모델링

시간 영역에서의 간단한 평균전력이론을 고찰하고, 확장된 3차원 전류 좌표계로 능동전력필터의 보상성능을 평가하기 위해 C-언어에 의한 시뮬레이터를 개발하였다.

C-언어에 의한 시뮬레이터는 ACSL등과 같은 기존의 S/W Tool에 비해 PC의 기종과 환경에 구애받지 않고 \*EXE의 실행파일만으로 실행 가능하므로 휴대가 간편하다. 또한 기존의 Tool에 의한 시뮬레이션 알고리즘은 제어회로를 실제 구현시 C-언어로 제어 프로그램을 다시 구성해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 차후 PC기반 또는 원칩에 의해 본 알고리즘을 곧바로 제어기에 전용하기 위해 C-언어에 의한 시뮬레이터를 개발하게 되었다.

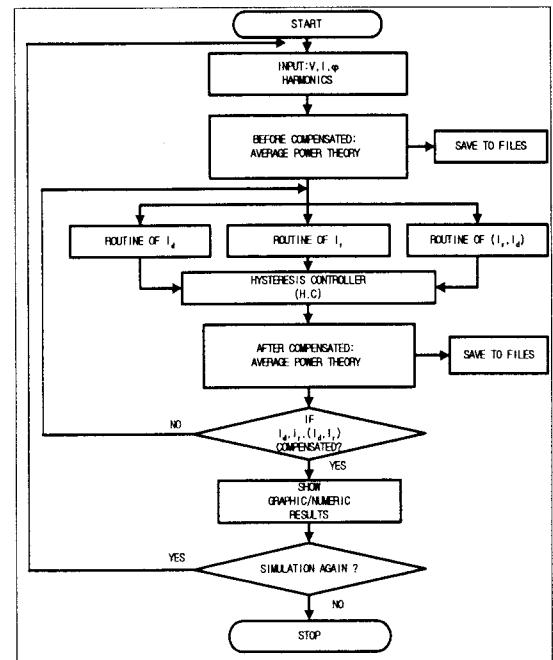


그림3 시뮬레이션 흐름도

Fig.3 Flow Chart of simulation

그림3은 제안된 이론의 타당성을 검증하기 위해 C-언어에 의해 개발된 시뮬레이터의 흐름도를 나타내고 있다. 먼저 A/D변환기로 입력되는 교류 전압, 교류 전류를 모의하기 위해 교류 전압, 교류 전류의 크기 및 변위각, 전류에 대한 고조파와 전압 전류의 샘플링 개수가 입력되면, 이 입력 데이터에 의해 순시 전압, 순시 전류 신호가 생성

된다. 전압, 전류의 순시차 샘플링은 주기당 512개이며, 60[Hz]인 경우 샘플링 시간은 32.5 [μs]이고 1초당 샘플링 개수는 30,720개이다. 이때 초기입력 데이터는 단순히 전압, 전류 파형을 발생시키는 데만 이용되어진다.

또 평균전력 알고리즘에 의한 전력 및 전류 분석 루틴으로부터 보상 전의 전력 및 전류의 성분, 역률 및 %THD가 계산되며, 그 결과를 데이터 파일로 저장한다. 분석된 보상 전의 전류 성분 중 유효 성분은 보상 대상이 아니므로 이 유효 성분을 제외한 기본파 무효 성분과 왜형 성분을 보상 기준 전류로 하여 히스테리시스 제어기(H.C)는 실제 주입할 보상 전류를 만들게 된다. 이 H.C는 출력전류가 보상 전의 전류에 주입되면, 원하는 전류 성분에 대한 보상이 끝나게 된다. 이로부터 전압과 원하는 성분이 제거된 전류를 새로운 입력으로 하여 평균전력 알고리즘에 의한 전력 및 전류 분석 루틴을 반복한다. 그 결과, 원하는 전류 성분이 보상된 데이터가 구해지며, 이 데이터 역시 파일로 저장된다. 본 연구에서 고찰한 평균전력 알고리즘을 표1와 그림4에 나타낸 시뮬레이션 모델에 적용해보았다.

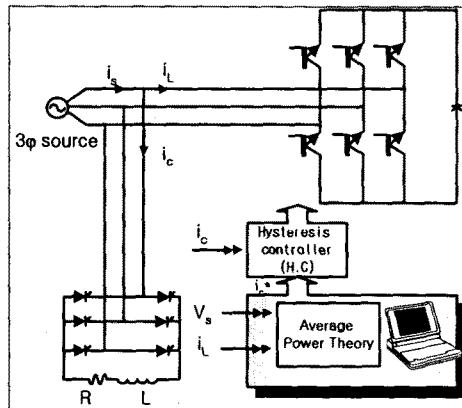


그림4 능동전력필터 시뮬레이션 모델

Fig.4 Simulation model of active power filter

표 1 시뮬레이션 파라미터

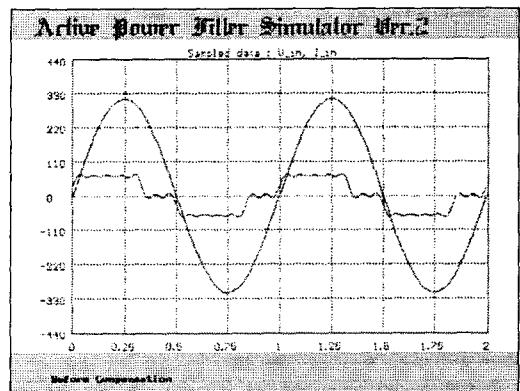
Table1 Simulation parameters

parameters	parameters values
control part	
source voltage/current	220V/50A
sampling number/1cycle	512
H.C band	5%
thyristor rectifier load	
displacement angle	45° (inductive) -45° (capacitive)
R	30Ω
L	5mH
harmonics	5,7,11,13[th]

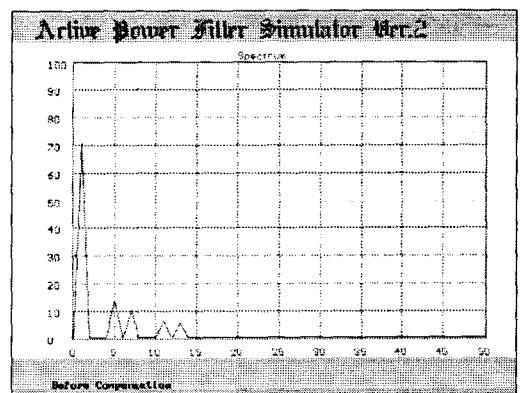
#### 4. 결과 및 고찰

그림5는 용량성 비선형 부하의 보상 전의 시간 영역, 주파수 영역 그리고 확장된 3차원 좌표계에서의 능동전력필터의 보상성능 평가법을 나타내고 있다. 그림6은 보상 후의 결과를 나타내고 있는 것으로 시간 영역과 주파수 영역의 평가법은 능동전력필터의 보상특성상 관심 있

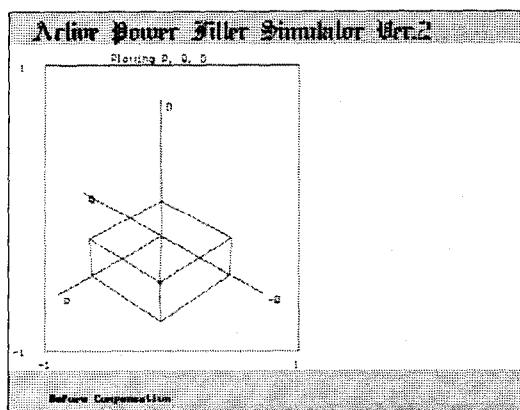
는 유효 성분, 기본파 무효 성분 그리고 왜형 성분의 변화를 독립적으로 나타내질 못하고 있음을 보여주고 있다.



(a) time domain



(b) frequency domain



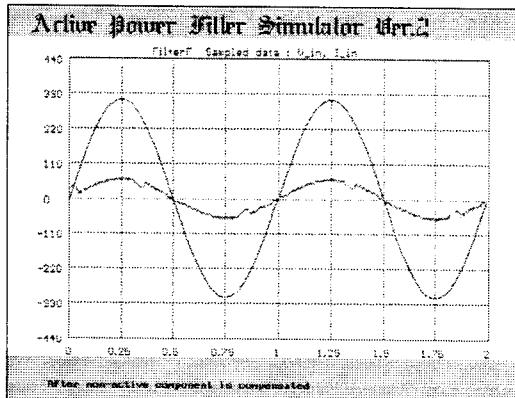
(c) expanded 3-D coordinates

그림5 보상 전의 시뮬레이션 결과

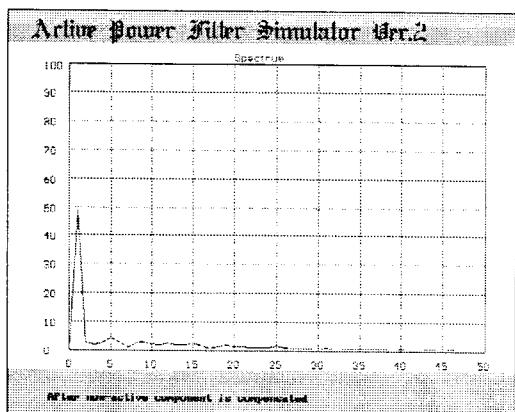
(용량성 부하,  $\varphi = -45^\circ$ )

Fig.5 Simulation results before compensated

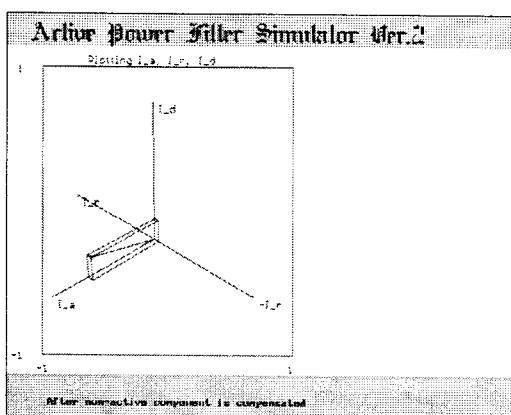
(Capacitive load,  $\varphi = -45^\circ$ )



(a) time domain



(b) frequency domain



(c) expanded 3-D coordinates

그림6 보상 후의 시뮬레이션 결과  
(용량성 부하,  $\varphi = -45^\circ$ )  
Fig.6 Simulation results after compensated  
(Capacitive load,  $\varphi = -45^\circ$ )

특히 주파수 영역에서의 평가는 기본파 성분에 함유되어 있는 60Hz 주파수의 유효 성분과 기본파 무효 성분의 변화량을 파악하기에 매우 곤란함을 보여주고 있다. 그러나

3차원 전류 좌표계에 의하면 3 전류 성분의 변화를 한 눈에 쉽게 파악할 수 있다. 특히 그림5(c)와 그림6(c)는 종래의 3차원 전류 좌표계로는 유도성 부하 전류와 구분하기 어려운, 용량성 부하 전류를 확장된 3차원 전류 좌표계에서 어떻게 가시화가 가능한가를 보여주고 있다. 이미 2.2 절의 그림2에서 나타낸 바와도 같이 용량성 부하 전류는 종래의 3차원 전류 좌표계의 기본파 무효 전류 좌표축을 유도성 전류 좌표축  $+i_r$ 로 하고, 유도성 전류 좌표축의 반대 좌표축을 용량성 전류 좌표축  $-i_r$ 로 하면 그림5,6의 c)와 같이 3차원 전류 좌표상에서 용량성 부하 전류를 가시화 할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전력을 간단히 분석할 수 있는 평균전력이론을 고찰하고, 능동전력필터의 확장된 보상성능 평가법을 제시하였다. 종래의 시간 영역 / 주파수 영역에서의 보상성능 평가법은 능동전력필터의 주 관심인 유효 전류, 기본파 무효 전류 및 왜형 전류의 변화를 한꺼번에 파악하기 곤란하였다. 3차원 전류 좌표상에 3 전류 성분을 가시화하면 보상 전 후의 3 전류 변화량을 한 눈에 파악하기는 용이하다. 그러나 이 방법 또한 기본파 무효 전류가 유도성인지 용량성인지 가시화 하기는 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서 제시된 확장된 3차원 전류 좌표계에 의하여 기본파 무효 전류를 용량성과 유도성으로 나누어 가시화가 가능하였다. 본 연구 결과에 의하여 부하와 무관하게 3차원 전류 좌표계에서 능동전력필터의 보상성능을 평가할 수 있는 새로운 지표가 마련되길 기대한다.

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

## [ 참고문헌 ]

- [1] H. Akagi, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.20, no.3, pp.625-630, 1984.
- [2] A. Ferrero and G. Superti-Furuga, "A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems Under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Trans. Instrum. meas., vol.40, pp.568-577, 1991.
- [3] J. H. R. Enslin and J. D. Van Wyk, "A New control Philosophy for Power Electronic Converters as Fictitious Power Compensators", IEEE Trans. Power Electron., vol.5, no.1, pp.88-97, 1990.
- [4] D. Torry and A. AL-Zamel, "Single-Phase Active Power Filters for Multiple Nonlinear Loads", IEEE Trans. Power Electron., vol.10, no.3, pp.263-272, 1995.
- [5] Y. G. Jung and Y. C. Lim, "Simulator Development for Evaluating Compensation Performance of Hybrid Active Power Filter using Three-Dimensional Space Current Co-ordinates", in Conf. Rec. IEEE PEDS, 1995, pp.427-432
- [6] Y. G. Jung and Y. C. Lim, "A DSP Based Power Analyzing and Control System Using Three-Dimensional Current Coordinates", in Conf. Rec. IEEE IECON 1996, pp.1094-1099.
- [7] Y. G. Jung, Y.C.Lim and S. H. Yang, "Single-Phase Active Power Filter based on Three-Dimensional Current Coordinates", IEE Proc. Electro. Power Applicat., vol. 147, no. 6, Nov., pp. 572~578, 2000.