

능동전력필터의 간단한 순시전력이론과 수정된 보상성능 평가법

정영국* 유광호* 김영철* 양승학** 김우용***⁰ 임영철***

*대불대 전기전자공학부 **호남대 전기공학과 *** 전남대 전기공학과

A Simple Instantaneous Power Theory and Modified Compensation Performance Evaluation of Active Power Filters

Y.G. Jung* K.H Yoo* Y.C Kim* S.H.Yang** W.Y.Kim***⁰ Y.C.Lim***

*Daebul University **Honam University ***Chonnam National University

Abstract - The fictitious power theory in time domain is very easy to understand, but power analyzing time of active power is increased, because power is analyzed using signal techniques based on the correlation between voltage and current waveforms. Also, conventional methods in time/frequency domain to evaluate 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 inductive or capacitive. Therefore, To overcome problems mentioned previously, this paper deals with the simple instantaneous power theory and the modified 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.

등에 의해서 능동전력필터에 본격적으로 적용되었다. 근래에 와서는 Van Wyk과 Enslin[4]에 의해 가상전력이론이 제시되었다. 그러나 가상전력이론은 전압과 전류의 상관할 수 알고리즘에 의하여 전력이 분석되므로, 전압과 전류의 샘플링 갯수의 제곱에 비례하는 많은 연산시간과 기억용량이 필요하여, DSP에 의해서만 비로소 실시간 전력분석 및 제어가 가능하다. 한편 능동전력필터에 일반적으로 이용되고 있는 시간 영역과 주파수 영역에서의 보상성능 평가법 [5]은 교류전류의 유효성분, 기본파 무효성분, 왜형성분들의 순시적 변화를 알 수 없고, 항상 두 영역의 평가가 동시에 존재하는 번거러움이 있다. 따라서 저자들은 능동전력필터의 보상성능을 평가하는 방법으로 3차원 전류 좌표계 해석법[6-8]을 제시한 바 있다. 이 방법은 평가하고자 하는 교류전류를 유효성분, 기본파 무효성분 그리고 왜형성분등 3성분으로 분해하여 이를 기반으로 하여 3차원 전류 좌표계를 구성한 후, 각 전류성분의 존재량으로 능동전력필터의 보상성능을 평가하는 방법이다. 그러나 이 방법은 유도성 부하전류와 용량성 부하전류를 모두 동일 공간상에 3차원적으로 나타내므로 평가되는 부하전류가 용량성인지 유도성인지 파악할 수 없었다.

1. 서론

최근 산업시설에서 가전제품에 이르기 까지 전력외란에 민감한 전자부품 및 장비가 급증함에 따라, 고조파 및 무효전력과 같은 전력외란을 보상하기 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 능동전력필터는 대표적인 전력전자변환장치라 할 수 있다. 능동전력필터에 적용 가능한 여러 순시전력이론중에서 Akagi[1]등에 의해 제시된 " α - β 변환 p-q 이론"과 Ferrero[2]의 "Park Vector"는 대표되는 순시전력이론이다. 이 방법은 여러번의 매트릭스 계산등이 필요하므로 하드웨어 구현과 단상에는 적용하기 어려운 점이 있다. 따라서 매트릭스 계산에 의한 p-q이론과는 다른 여러 방법이 연구중이며 시간영역에서의 전력분석은 대표적인 방법이라 할 수 있다. 이 방법은 비교적 쉬운 수학적인 디지털 신호처리에 의해서 구현될 수 있으며, Harashima[3]

따라서 본 연구에서는 종래의 시간영역에서의 전력분석법과 비교하여 비교적 전력을 간단히 분석할 수 있는 순시전력이론을 제시하고, 유도성 부하전류 뿐만 아니라 용량성 부하전류에도 모두 적용 가능한 능동전력필터의 수정된 보상성능 평가법을 제시하였다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위해 C언어에 의한 능동전력필터용 시뮬레이터를 개발하였으며, 종래의 시간영역에서의 가상전력이론에 비하여 본 연구에서 제시된 방법의 우수성을 입증할 수 있었다

2. 제안된 순시전력이론

교류전압 $v(t)$ 가 정현파라 하더라도, 교류전류 $i(t)$ 는 전력전자기기의 비선형 특성으로 인해 왜형이 되며, 이때 전압과 전류의 실효치 V, I 및 피상전력 S , 유효전력 P 는 다음과

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

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

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

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

또한 기본파 무효전력Q는 식(5),식(6)과 같이 $t=T/4$ 주기 (90°)만큼 이동한 교류전압에 의해서 구해진다. 즉 유도성 부하인 경우, 기본파 무효전력은 식(5)와 같이 $t=T/4$ 주기 ($+90^\circ$)만큼 이동하여 교류전류와 곱하면 되며, 용량성 부하인 경우는 식(6)과 같이 $t=-T/4$ 주기(-90°)만큼 교류전압을 이동하여 교류전류를 곱하면 기본파 무효전력이 구해진다

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

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

전력의 각 성분들은, 서로 독립적이며 직교성이 유지되므로 왜형전력D는 식(7)로 구해진다.

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

이상의 분해된 전력성분으로 부터, 비선형 부하의 등가변수 G, B, K가 얻어진다.

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

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

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

등가변수G, B, K로 나타난 비선형 부하의 유효전류 순시치 $i_a(t)$ 와 왜형전류 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 무효전류 순시치 $i_r(t)$ 과 용량성 부하전류 $i_c(t)$ 는 다음으로 구해진다.

$$i_r(t) = Bv(t - \frac{T}{4}) \quad [\text{Inductive Load}] \quad (13)$$

$$i_c(t) = Bv(t + \frac{T}{4}) \quad [\text{Capacitive Load}] \quad (14)$$

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.

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

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

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

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

이상에서 언급된 시간영역에서의 전력분석 알고리즘에 의하면 방대한 반복연산 과정으로 말미암아 실시간 전력분석 및 제어를 위해 DSP가 요구되어지는 시간영역에서의 대표적인 가상전력이론의 문제점을 간단하게 해결할 수 있다. 특히 종래의 3상 전력분석을 위해 사용되어 오던 p-q이론과 주파수 영역의 접근법에 비해 제안된 방법은 비교적 간단하고 쉬운 수학적인 디지털 신호처리만으로 단상 뿐만 아니라 3상의 전력분석에 모두 적용 가능하다.

3. 능동전력필터의 수정된 보상성능 평가법

능동전력필터에 일반적으로 사용되고 있는 시간 영역과 주파수 영역에서의 보상성능 평가법은 교류전류의 유효성분, 기본파 무효성분, 왜형성분들의 순시적 변화를 알 수 없고, 항상 두 영역의 평가가 동시에 존재하는 번거로움이 있다. 이와 같은 능동전력필터의 보상성능 평가법을 개선하기 위하여 교류전류를 유효성분, 기본파 무효성분 그리고 왜형성분등 3성분으로 분해하여 이를 기반으로 하여, 보상전후의 각 전류성분의 존재량으로 평가하는 3차원 전류 좌표계가 제시되었다. 그림1은 종래의 3차원 전류좌표계에 의한 평가법을 나타내고 있다.

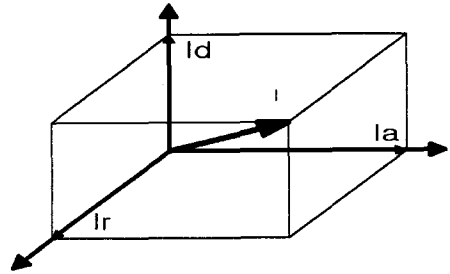


Fig.1. Conventional 3-D current coordinates

그림1에서 나타낸 바와 같이 용량성 및 유도성 부하전류를 모두 한 공간 좌표계에 가시화 하므로 부하에 따른 전류특성을 파악하기 불가능하다. 그러나 종래의 3차원 전류 좌표계의 기본파 무효전류 좌표축을 유도성 전류좌표축 +Ir로 나타내고, 유도성 전류좌표축의 반대 좌표축을 용량성 전류좌표축 -Ir로 표기하면 3차원 전류 좌표상에 유도성 부하전류와 용량성 부하전류를 모두 가시화 가능하게 된다. 따라서 본 연구에서 제시된 용량성과 유도성 기본파 무효전류를 모두 분석 가능한 순시전력이론에 의하여 종래의 3차원 전류좌표계의 모호한 전류표현을 부하특성에 따라 확고하게 가시화 할 수 있도록 수정된 3차원 전류좌표계를 그림2에 나타내었다.

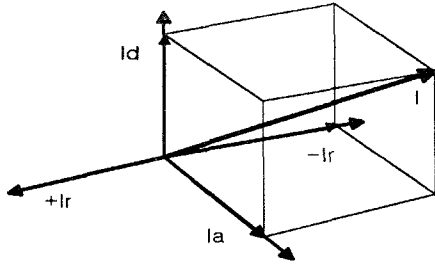
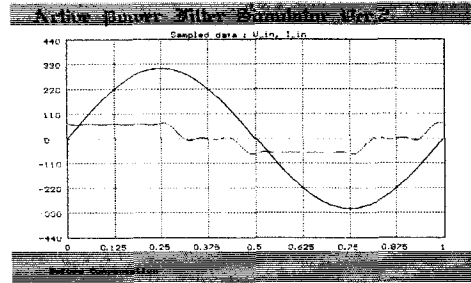


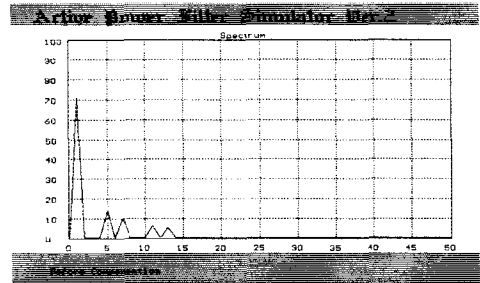
Fig.2. Modified 3-D current coordinates

4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

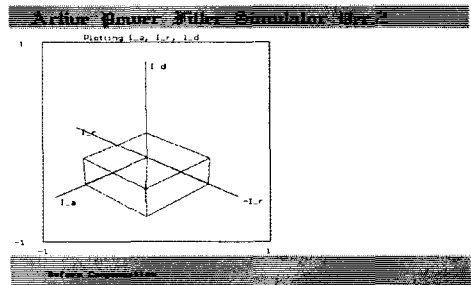
시간영역에서의 제안된 순시전력이론의 타당성을 검증하기 위해서 시간영역에서 대표적인 가상전력이론과 전력분석 및 제어결과를 표1에 비교하였다. 3상 유도성 비선형 부하에서 발생하는 고조파는 5, 7, 11, 13이며, 변위각 ϕ 가 45° 인 경우를 시뮬레이션 조건으로 하였다. 제안된 이론과 종래의 시간영역에서의 가상전력이론의 전력분석 및 제어 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 제안된 이론과 종래의 시간영역에서의 이론이 모두 부하전류가 50A이며 교류전압과 전류의 변위각이 45° 일때를 시뮬레이션 조건으로 하였기 때문에, 동일 고조파를 갖는 경우, 변위각이 적은 조건에 비해서 더 큰 보상의 부담을 능동전력필터가 가지므로 왜형성분에 대한 보상성능이 떨어진다. 그러나 본 연구는 보상방법의 개선에 있는 것이 아니고 종래의 시간영역에서의 전력분석방법과 동일한 결과를 얻으면서도 소프트웨어의 부담을 경감시키는 간단한 알고리즘 개발에 있으므로 이와 같은 것은 고려하지 않아도 된다. 그림3은 용량성 비선형 부하의 보상전의 시간영역, 주파수영역 그리고 수정된 3차원 전류 좌표계에서의 능동전력필터의 보상성능 평가법을 나타내고 있다. 그림4는 보상후의 결과를 나타내고 있는 것으로 시간영역과 주파수영역의 평가법이 능동전력필터의 보상특성상 관심 있는 유효성분, 기본파 무효성분 그리고 왜형성분의 변화를 독립적으로 나타내질 못하고 있음을 보여주고 있다.



a) Time domain



b) Frequency domain

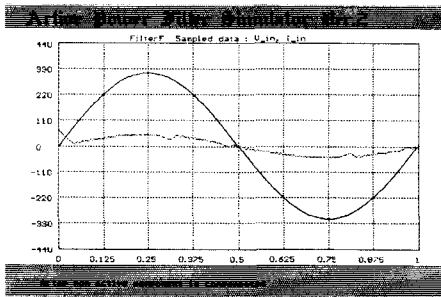


c) Modified 3-D coordinates

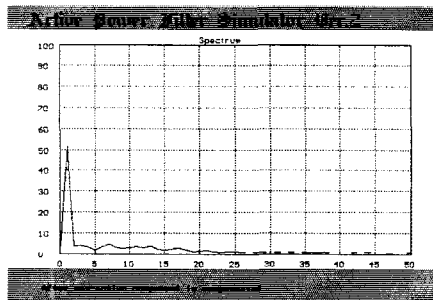
Fig.3 Simulation results before compensated (Capacitive load $\phi = -45^\circ$)

Table1. Comparison of Proposed Theory and Conventional Theory

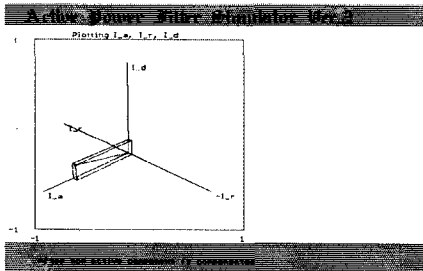
		ϕ [°]	[V]	[A]	[SVA]	[PW]	[QVARI]	[DVARI]	[IA]	[IA]	[IA]	p.f.	%THD
Fictitious power theory	Before compensated	45	220	51.03	11402.9	7770.17	7778.18	3004.19	35.36	35.36	13.66	0.682	27.31
	After compensated	3.52	220	37.72	8299.36	7995.45	444.754	2180.45	36.34	2.02	9.91	0.963	27.23
proposed power theory	Before compensated	45	220	51.83	11402.9	7778.17	7778.17	3004.22	35.36	35.36	13.66	0.682	27.31
	After compensated	3.20	220	37.72	8299.36	7995.45	446884	2180.01	36.34	2.03	9.91	0.963	27.22



a) Time domain



b) Frequency domain



c) Modified 3-D coordinates

Fig.4 Simulation results after compensated
(Capacitive load, $\varphi = -45^\circ$)

5. 결 론

본 연구에서는 종래의 시간영역에서의 가상전력이론과 비교하여 비교적 전력을 간단히 분석할 수 있는 순시전력이론을 제시하고, 능동전력필터의 수정된 보상성능 평가법을 제시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 방대한 반복연산 과정으로 말미암아 실시간 전력분석

및 제어시 DSP가 요구되어지는 시간영역에서의 대표적인 가상전력이론의 문제점을, 제안된 순시전력 알고리즘에 의하여 간단하게 해결 할 수 있다.

2) 종래의 3상 전력분석을 위해 사용되어 오던 p-q이론에 비해, 제안된 알고리즘은 비교적 간단하고 쉬운 수학적인 디지털 신호처리만으로도 단상 뿐 만 아니라 3상의 전력분석이 모두 가능함을 밝혔다.

3) 본 연구에서 제시된 용량성과 유도성 기본과 무효전류를 모두 분석 가능한 순시전력이론에 의하여 용량성 부하전류를 가시화 할 수 있도록 수정된 3차원 전류 좌표계를 제시하였다.

4) 차후의 연구과제로써, 종래의 p-q이론과 그 제어 및 성능특성을 제안된 순시전력 알고리즘과 비교 분석하기 위한 실험이 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] H. Akagi, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-20, no.3, pp.625-630, 1984.
- [2] A. Ferrero, G. Superti-Furga, "A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems Under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Trans. on Instrum. meas., vol.40, pp.568-577, 1991.
- [3] F. Harashima, H. Inaba, "A Closed-Loop Control System for the Reduction of Reactive Power Required by Electronic Converters", IEEE Trans. on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-23, no.2, pp.162-166, 1976.
- [4] J. H. R. Enslin, J. D. Van Wyk, "A New control Philosophy for Power Electronic Converters as Fictitious Power Compensators", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.5, no.1, pp.88-97, 1990.
- [5] D. Torry, A. Al-Zamel, "Single-Phase Active Power Filters for Multiple Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.10, no.3, pp.263-272, 1995.
- [6] Y. G. Jung, Y. C. Lim, "Simulator Development for Evaluating Compensation Performance of Hybrid Active Power Filter using Three-Dimensional Space Current Co-ordinates", IEEE PEDS, (Singapore), pp.427-432, 1995.
- [7] Y. G. Jung, Y. C. Lim, "A DSP Based Power Analyzing and Control System Using Three-Dimensional Current Coordinates", IEEE IECON, (TAIWAN), pp.1094-1099, 1996.
- [8] Y. G. Jung, Y. C. Lim, F. Harashima, "Instantaneous Compensating Power Flow Diagram of Active Power Filters", ISPE (SEOUL), pp.882-887, 1998.