

3次元 電流座標에 의한 能動電力필터의 補償性能 評價를 위한 시뮬레이터 開發

임영철* 정영국* 나석환* 최찬학* 장영학**

* 전남대학교 ** 목포대학교

Simulator Development for Evaluating Compensation Performance of Active Power Filter using Three-Dimensional Space Current Co-ordinate

Young-Choel Lim* Young-Gook Jung* Suk-Hwan Na* Chan-Hak Choi*
Young-Hak Chang**

* Chonnam National University

** Mokpo National University

Abstract - This paper describes an effort to develop a simulator of Active Power Filter(APF) by three dimensional(3-D) space current co-ordinate. System current is represented by 3-D vector composed of three current components - active, reactive and distorted. α THD (α Total Harmonics Distortion) can be converted to height-angle of system current vector and power factor can be defined on 3-D space current co-ordinate without loss of generality. Current of APF and power system can be analyzed by 3-D visualization of current vector trajectory. So, the computer simulation results show that the proposed method by 3-D space current co-ordinate make up for disadvantages of performance evaluation on time / frequency domain.

1. 서론

그린 라운드(Green Round)와 신 경제질서의 등장으로 에너지 절감이 요구되는 요즘, 전력계통의 고조파 제거 및 역률개선의 필요성이 차츰 증가하고 있다. 과거의 수동필터는 고조파 성분의 불확정성, 가변성에 대응하기 어렵다는 단점을 갖고 있으므로, 최근 이를 대체하는 방안으로 능동전력필터(이하 APF라 함)에 관한 많은 연구가 진행 중이다.[1-2] 지금까지의 APF에 관한 대부분의 연구는, 장애가 되는 계통의 전류를 APF로 보상하기 전과 APF로 보상한 후로 구분하여, 주파수영역과 시간영역에서 각각 비교 평가하는 것이었다. 이와 같은 시간/주파수 영역에서의 종래의 보상평가법은 보상 전후의 유효, 무효, 왜형전류의 변화량을 한눈에 파악하기 힘들고, 항상 시간영역과 주파수영역의 평가를 동시에 행해야 하는 번거로움이 뒤따랐다. 또 주요 고조파는 수동필터에서 흡수하고 非理論的 低次 高調波 또는 非定數次 高調波들은 APF에서 보상함으로써 전체 APF 시스템을 효율적으로 운용할 수 있는 하이브리드(Hybrid) 방식의 APF에 관한 연구도 진행된 바 있다.[3-5] 그러나 이들은 보상전류분담에 관한 정량적인 해석이 없이 이루어졌으므로, APF 시스템은 연구노력에 비해 그다지 효율적이지 못했다. 최근들어 Roos와 Harmelen[6], Van Wyk 과 Enslin[7] 등에 의해 보상전류분담에 관한 정량적인 해석이 마련됨에 따라, 보상을 위한 완전한 무효전류와 왜형전류의 분리가 가능해졌으며, 즉 무효전류는 콘덴서 뱅크(Bank)에 의해서, 왜형전류는 APF가 담당하여 보상하므로써 효율적인 APF 시스템을 실현할 수 있게 되었다. 따라서 이와같은 무효전류와 왜형전류를 분리하여 보상 가능한 하이브리드 방식의 APF 시스템에 적합한 보상평가법이 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 제시한 문제점을 개선하기 위해서 3차원 전류좌표에 의한 APF성능평가를 위한 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 보상 전과 보상 후의 전력을 분석하는 기능을 갖

고 있으며, 2차원 벡터에 의해 계통전류를 나타내지 않고, 유효, 무효, 왜형의 세성분을 갖는 3차원 벡터로 나타냈다. 3차원 전류좌표상에서 역률정의가 가능함과 α THD(총고조파 왜형률)를 대체할 수 있는 계통전류벡터의 高度角을 제시하였으며, 그 물리적인 의미를 고찰하였다. 또 3차원 공간상에서 계통전류벡터의 궤적을 可視化함으로써, APF 뿐만 아닌 일반전력계통의 정교한 해석이 가능하게 되었다. 끝으로, 본 연구의 타당성을 입증하기 위해서 시뮬레이션을 한 결과, 종래의 APF 보상성능 평가법의 단점을 보완가능하며, 전체 APF 시스템을 효율적으로 운용할 수 있는 하이브리드(Hybrid) 방식에 부합되는 평가방법임이 증명되었다.

2. 전류좌표와 역률정의

그림 1은 지상부하전류를 두 성분으로 분해한 종래의 전류좌표로써, 이는 일반적으로 사용해 온 복소좌표와 동일하며 선형부하인 경우 이 개념은 타당하다. 그러나 비선형 싸이리스터 부하인 경우에는 선형부하와는 다르게 왜형전류가 발생한다. 이 왜형전류는 狹義의 무효전류이지만 전원과 주파수가 다르고, 무효전류와는 발생되는 원인이 다르므로, 무효전류와 왜형전류를 서로 구분 지을 필요가 있다. 그림2는 종래의 2차원 전류좌표로는 표현이 불가능한 I_d 를 I_a 와 I_r 에 대해서 각각 직교시킴으로써, 전류를 3차원 좌표에 의하여 벡터로 나타낸 것이다. 이때 좌표를 주파수와는 무관한 실효치로 설정하였으므로, 각 성분사이의 각도는 기존의 페이지의 위상과는 아무런 상관없다.

2.1 일반적인 역률정의 [8-9]

비선형 싸이리스터부하에 정현파 전압을 인가하는 경우, 변위각 (displacement angle)을 ϕ_1 라 하고 $\cos \phi_1$ 을 변위역률(displacement Power Factor)이라 하면, 다음의 관계가 성립된다.

$$\text{유효전력 } P = V I_1 \cos \phi_1 \tag{1}$$

$$\text{피상전력 } S = V I \tag{2}$$

$$\text{역률 } \cos \phi_2 = (P / S) \tag{3}$$

$$= (I_1 / I) \cos \phi_1 \tag{4}$$

2.2 3차원 전류좌표에서의 역률정의

비선형 싸이리스터 부하에 왜형률이 극히 낮은 정현파 전압 V 를 인가하는 경우, 전류 I 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_d^2 \tag{5}$$

$$= I_a^2 + I_n^2 \quad (I_n^2 = I_r^2 + I_d^2) \tag{6}$$

$$= I_1^2 + I_d^2 \quad (I_1^2 = I_a^2 + I_r^2) \tag{7}$$

이 때, 왜형전류 I_d 를 고려하지 않은 2차원 역률을 변위역률이라 하고 $\cos \phi_1$ 로 나타내며, I_d 를 고려한 2차원 역률을 $\cos \phi_2$, 3차원 좌표에서 정의된 역률을 $\cos \phi_3$ 라 한다. 이때 $\cos \phi_2$ 와 $\cos \phi_3$ 사이에는 $\alpha DF (= I_1 / I)$ (αDF : Distortion

Factor: 왜형률)의 관계가 있으므로, 2차원 전류좌표의 유효성분은 3차원으로 확장할 때도 동일한 값을 갖게 된다. 따라서 식 (4)를 3차원으로 확장할 경우의 역할은

$$\cos \varphi_3 = \frac{\text{3차원 전류벡터의 크기} \cdot \cos(\text{3차원 역할각})}{\text{3차원 전류벡터의 크기}} \quad (8)$$

$$= \frac{\text{3차원 전류벡터의 유효성분크기}}{\text{3차원 전류벡터의 크기}} \quad (9)$$

와 같으므로, 2차원 역할을 3차원 전류좌표에서 정의하여도 역할정의에 위배되지 않는다. 항상 $\cos \varphi_1$ 와 $\cos \varphi_3$ 간에는

$$\cos \varphi_1 \geq \cos \varphi_3 \rightarrow \varphi_1 \leq \varphi_3 \quad (10)$$

($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \leq 90^\circ$)

의 관계가 성립하나 만약 $I_a \rightarrow 0$ 이면 $\varphi_1 = \varphi_3$ 이다. 또 3차원 전류벡터 I와 기본파 전류벡터 I_1 와의 각도, 즉 전류벡터I의 高度角 (Height-angle)을 λ 라 할때

$$\lambda = \tan^{-1} (I_a / I_1) \quad (11)$$

$$\tan \lambda = I_a / I_1 \quad (12)$$

이 성립한다. 그런데 총고조파 왜형률 xTHD는 식(12)로 주어 지므로 λ 와 xTHD와의 관계는 다음과 같게 된다.

$$xTHD = 100 \cdot I_a / I_1 [\%] \quad (13)$$

$$\lambda = \tan^{-1} (xTHD / 100) \quad (14)$$

$$xTHD = \tan \lambda \cdot 100 \quad (15)$$

일반적으로 어떤 전력계통이 주파수 영역에서 해석되어질 때, 항상 주어지게 되는 xTHD로부터 전류벡터의 高度角 λ 는 식(14)로 구할 수 있다. 따라서 λ 는 전류의 총고조파 왜형률의 기준이 되며, λ 가 클수록 전류에는 고조파가 많이 함유되고 정현파에서는 0° 로 된다. 그림4는 이들 관계를 나타낸 것으로, 대부분의 경우 xTHD는 100[%] 이하이므로 λ 는 45° 를 넘지 않게 된다. 또 그림 5에 있는 전류I와 I_r, I_a, I_a 가 이루는 각을 각각 $\alpha_3, \varphi_3, \lambda_3$ 라 할 때, 이들 사이에는 다음이 성립하므로

$$\cos \varphi_3 = I_a / I \quad (16)$$

$$\cos \alpha_3 = I_r / I \quad (17)$$

$$\cos \lambda_3 = \sin \lambda = I_a / I \quad (18)$$

$\cos \varphi_3, \cos \alpha_3, \cos \lambda_3$ 는 각각 전류전류에 포함되어 있는 유효전류, 무효전류 그리고 왜형전류의 존재비를 나타내게 된다. 따라서 $\cos \varphi_3$ 는 클수록, $\cos \alpha_3, \cos \lambda_3$ 는 작을수록 더 많은 유효전력을 부하로 공급할 수 있기 때문에 $\cos \alpha_3$ 를 3차원 무효율, $\cos \lambda_3$ 를 3차원 왜형률이라 정의 가능하다.

3. 시뮬레이터의 구성

3차원 전류좌표에 의한 APF의 성능평가를 위한 시뮬레이터의 동작특성을 이해하기 위해서, 그림6의 전체 흐름도를 살펴 보기로 한다. 먼저, 전압전류의 샘플링 갯수, 전압전류의 크기 및 전류에 대한 고조파 양을 입력하면, 전압, 전류파형의 상관함수적 신호처리 알고리즘에 의한 전류분해 루틴으로부터 보상전의 전력 및 전류의 성분, 2차원 좌표에 의한 역할 및 3차원 전류좌표상에서 정의된 역할, xTHD와 전류벡터의 高度角 λ 를 계산, 비교하게 되며, 그 결과를 데이터 파일로 저장한다. 분해된 보상 전의 전류성분 중 유효성분은 보상 대상이 아니므로 이 유효성분을 제외한 무효성분, 왜형성분 또는 무성분을 합한 비유효성분만을 각각 따로 보상했을 때의 결과를 시뮬레이션 해 봄으로써, 계통에서 발생가능한 모든 상황을 예측하여 효율적인 APF 시스템의 운용을 할 수 있는 것이다. 제거코자하는 성분들을 각각 기준 보상전류로 하

여 정현파 밴드 히스테리시스 제어기 (HC)는 실제 주입할 보상전류를 만들게 된다. 이 HC 출력전류가 보상 전의 전류에 주입되면, 원하는 전류성분에 대한 보상이 끝나게 된다. 이로 부터 전압, 그리고 원하는 성분이 제거된 전류를 새로운 입력으로 하여 앞의 전압 전류파형의 상관함수적 신호처리 알고리즘에 의한 전류 분해 루틴을 반복한다. 그 결과, 원하는 전류 성분이 보상된 전력량들이 구해지며, 이 데이터 역시 파일로 저장된다. 보상 전과 보상 후의 데이터로 부터 보상 전 후의 전력량과 시간영역에서의 전압전류파형, 주파수 영역에서의 전류 스펙트럼, 3차원 전류벡터도 및 각 전류성분의 변화에 따른 전류벡터의 궤적도를 동일 화면상에 좌표회전이 가능한 상태로 보여주며 시뮬레이션을 끝마치게 된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 전력분석

3상 비선형 싸이리스터 부하를 사용하는 교류 220[V] 전원선로의 선간에서 발생하는 고조파가 5, 7, 11, 13次數로 일정하다 할 때, 변위각 φ_1 에 따른 전력분석과 그 보상결과를 표1에 나타냈다. 먼저 표1 a)는 보상 전의 결과인데, 왜형성분은 변동이 없으므로 φ_1 이 증가되더라도 전류벡터의 高度角 λ 는 일정하나, 3차원 역할 $\cos \varphi_3$ 는 감소함을 보여주고 있다. 또 표1 b)는 보상후의 결과로서 모든 변위각에 걸쳐 $I \cdot I_a$ 인 관계가 성립하며, 이는 보상 후 전류전류는 거의 유효전류로 됨을 나타내준다. 한편 φ_1 이 60° 를 넘어서면 보상의 정확도가 떨어지는데, 이는 전술한 바와 같이 APF만으로 무리하게 매우 큰 무효전류와 왜형전류를 보상하려 했기 때문이다. 그러나 위상차가 작은 경우에는 APF만으로도 만족할 만한 보상결과를 얻을 수 있지만, 위상차가 커져 무효전류가 증가할 때는, 동일한 고조파가 함유돼 있더라도, APF는 위상차가 적은 경우보다 더 큰 보상의 부담을 갖기 때문에 보상성능이 떨어지게 된다. 따라서 표1 c)를 보면 알 수 있듯이, APF가 왜형성분을 담당하면, 무효전류의 크기에 무관하게 항상 일정한 xTHD (4.5 [%]이내)나 λ (2.5° 이내)를 유지할 수 있음을 알 수 있다. 물론 이 때 무효성분은 대용량의 콘덴서뱅크로 쉽게 보상 가능하다. 표2는 변위각이 30° 인 전력계통의 전력량들을 나타내고 있다. 표2를 보면 2차원 좌표의 역할인 $\cos \varphi_2$ (P.F)와 3차원좌표에 의한 역할 $\cos \varphi_3$ (P.F)이 일치하고 있다. 또 전류벡터의 高度角을 비교해 보면, 보상 전 15.27° (xTHD: 27.31[%])였던 것이, 보상 후 4.1° (xTHD: 7.18[%])로 감소되므로, 高度角을 새로운 왜형률로 나타낼 수 있다. xTHD가 10[%] 이하이면, 그 전력계통은 양호하므로, 보상 후 xTHD 10[%]에 상응하는 3차원 전류벡터의 高度角이 6° 이하이면, 그 APF 시스템은 양호한 보상능력을 갖고 있다고 평가할 수 있다.

4.2 3차원 전류벡터도

APF에 의해 제거코자하는 전류성분을 보상하기 전과 보상한 후를 그림 7,8에 나타냈다.

4.3 3차원 전류벡터의 궤적도

전류성분들의 변화량을 순간적으로 알 수 있다면, 그 전류에 대한 벡터궤적 역시 알 수 있다. 만일 전류가 동일 차원을 갖는 2개의 성분으로 분해되면, 2차원 평면상에서 그 전류벡터의 궤적도를 나타낼 수 있고, 3개의 전류성분으로 분해되면, 3차원 공간상에서 전류벡터의 궤적도를 나타낼 수 있다. 전류의 순서치가 주기적인 변화를 하는 경우, 그 전류벡터의 궤적은 원이 되며, 비주기적인 변화를 하면, 교차되지 않는 나선형의 원을 계속 그리게 된다. 그림9 a)는 계통전류의 유효, 무효, 왜형전류성분의 파형이며, 그림9 b)는 3차원 좌표상에서 나타낸 전류벡터의 궤적도, 그림9 c), 그림9 d), 그림9 e)는 그림9 b)에 있는 3차원 전류벡터의 궤적도를 각각 왜형 (I_a, I_r 좌표), 유효 (I_a, I_r 좌표), 무효 (I_a, I_r 좌표) 전류성분축에서 관찰하므로써, 복잡한 변화를 하고 있는 3차원 좌표상의 전류벡터궤적의 정확한 모습을 알 수 있게 해준다. 먼저,

그림9 c)에 있는 전류벡터 궤적도를 보면, 변위각 30° 일 때는 60° 일때보다 I_m 가 크므로, I_m 축상으로 펼쳐진 타원형으로 되며, 변위각이 커짐에 따라 차츰 I_m 축상에 집중된 타원형이 된다. 이 때 왜형성분이 없는 선형부하의 끝이 매끄러운 타원형의 궤적이 되나, 비선형 싸이리스터 부하에서는 그림9 c)와 같이 매끄럽지 못한 타원형이 된다. 그림10 b)의 전류벡터궤적은 원점을 중심으로 하여 양날개를 펴고 있는 나비형태인데, 무효성분에 의하여 나비의 양날개 길이가 결정되고, 왜형성분에 의해서 각 날개의 폭이 결정된다. 이상에서 볼 때, 비선형 싸이리스터 부하의 3차원 전류벡터 궤적도는 원점을 중심으로 하여 양날개를 펴고 있는 나비형태를 갖게된다. 전류벡터궤적이 한쪽 날개에서 다른 쪽 날개로 이동하는 이유는 왜형성분을 갖는 전류의 흐름이 반전하기 때문이다. 즉 전류벡터궤적의 끝점을 이은 폐곡선은 전류의 주기성(Periodicity), 전류벡터 궤적도의 접혀진 수건형태(Folded towel form)는 고조파에 의해 전류가 순간적인 변화를 하고 있음을 나타낸다. 전류벡터궤적의 변화가 심하여 겹쳐진 궤적의 형태를 파악하기가 어려울 때는, 3차원 전류좌표를 회전시킴으로써, 접혀진 수건 형태의 궤적을 다른 각도에서 관찰 할 수 있다. 만약 각도를 바꿔서 관찰한, 접혀진 수건 형태 부분을 갖는 전류벡터의 궤적이 평면적인 변화를 하고 있다면, 그 궤적은 지나온 궤적과는 다른 평면으로 변화하고 있음을 나타낸다. 반면에 직선의 형태로 나타나면, 궤적은 지나온 처음의 궤적과 동일 평면으로 변화하고 있음을 나타낸다. 이상과 같이, 3차원 좌표상의 전류벡터궤적에 의해서 전류의 운동을 3차원 공간에서 관측할 수 있다. 그림 10 a), b)는 변위각이 30° , 60° 인 경우, APF에 의해 보상된 전류벡터의 궤적도이다. 보상 후의 전류벡터궤적은 유효성분축에 집중되어 있고 무효 성분이나 왜형성분축에는 거의 없으므로 이 궤적도를 관측함으로써 보상 후의 전류상태를 한눈에 알 수 있다. 고조파가 동일할 때, 변위각이 30° 인 경우가 60° 인 경우보다 보상 후, 유효성분축에 전류벡터의 궤적이 집중되는 이유는, 30° 보다는 60° 일 때 무효전류가 더 크므로 APF는 30° 변위차가 나는 경우보다 더 큰 보상의 부담을 갖기 때문이다.

5. 결론

3차원 전류좌표에 의한 APF 보상성능평가를 위한 시뮬레이터를 개발한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. APF 보상성능 평가법으로써, 본 연구에서 개발된 시뮬레이터는 종래의 시간/주파수영역에서의 평가법과는 다르게, 3차원 전류좌표에 의해 보상 전과 보상 후의 계통전류를 전류벡터도와 전류벡터 궤적으로 나타낸 결과, 전체 APF 시스템을 효율적으로 운용할 수 있는 하이브리드 (Hybrid) 방식에 부합되는 평가법임을 입증하였다.
2. 3차원 전류좌표에 의한 APF 보상성능 평가용 시뮬레이터에서 계산된 전력량들과 2차원 전류좌표에 의해 계산된 전력량들을 비교한 결과, 서로 일치하여 본 연구의 타당성이 증명되었다.
3. 3차원 전류좌표상에서 역률 정의가 가능함을 밝혔고, 3차원 전류좌표상에서 xTHD를 대체할 수 있는 계통전류벡터의 高度角을 제시하였으며, 또 그 물리적인 의미를 고찰하였다.
4. 3차원 전류좌표상에서 계통전류벡터의 궤적을 可視化하여, APF 뿐 만 아닌 일반전력계통의 전류흐름에 대한 정교한 해석이 가능하게 하였다.
5. 본 연구에서 개발된 APF의 보상성능 평가용 시뮬레이터는 APF 해석에만 국한되지 않고, 일반전력계통을 분석할 수 있는 전력 분석기로도 사용할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Thanh-Nam Le, "Performance of Voltage-Source Active Filters", EPE Firenze, pp. 3-001 - 3-005, 1991.
- [2] M.X.Wang, "Operating Principle of an Active Harmonics Filter based on Fast Current Regulation ", EPE Firenze, pp.3-024 - 3-029, 1991.
- [3] S.Fukuda, M.Yamaji, "Design and Characteristics of Active Power Filter using Current Source Converter", IEEE IECON, pp.965 - 970, 1990.
- [4] Stephen M. Williams, Richard G.Hoft, " Adaptive Frequency Domain Control of PWM Switched Power Line Conditioner", IEEE Power Electronics, Vol.6, No.4, pp.665-670, Oct.1991.
- [5] Y.Hayashi, N.Sato, K.Takahashi, "A Novel Control of a current-Source Active Filter for ac Power System Harmonic Compensation", IEEE Trans. IA, Vol.27, No.2, pp.380 - 385, Mar./Apr. 1991.
- [6] J.G.Roos, G.L.Harmelen, "Digital Adaptive Control of a High Power Hybrid Compensator", EPE Firenze, pp. 2-052 - 2-057, 1991.
- [7] J.H.R.Enslin, J.D.Van Wyk, " Adaptive, Closed-Loop Control of Dynamic Power Filters as Fictitious Power Compensators ", IEEE Trans. Power Electronics, Vol.37, No.3, pp.203-211, Jun.1990.
- [8] Ned Mohan, Power Electronics : Converters, Applications, and Design, New York:Wiley, 1989, pp.30-32
- [9] Rex M. Davis, " Single Phase Supply Impedance: Its Measurement and Influence on Non-Linear (Rectifier) load ", EPE Firenze, pp. 3-374 - 3-378, 1991
- [10] 坪井 和男, " 半導體 應用 家電機器 の 高調波 電力 について の - 考察 ", PP.5-149 - 5-150, 平成 3年 電氣學會 全國大會

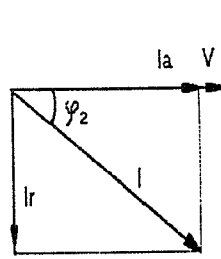


Fig.1 Conventional 2-D current co-ordinate

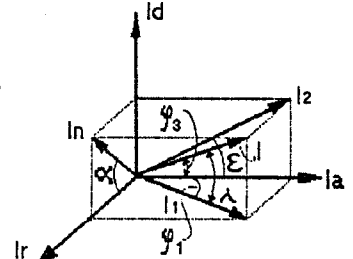


Fig.2 3-D space current co-ordinate

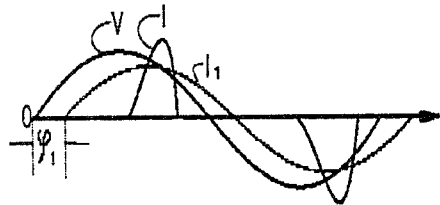


Fig.3 Current and voltage waveforms of non-linear thyristor loads

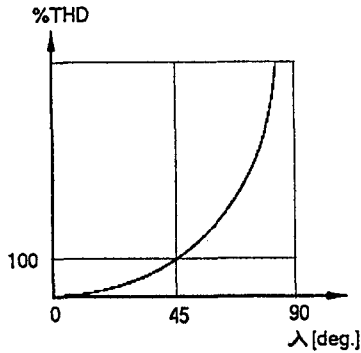


Fig.4 Variation of %THD according to λ

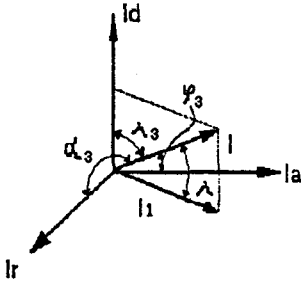


Fig.5 Relation between 3-D space current vector and it's components

Table 1 Results of compensation and power analysis for different ϕ_1 when distorted component is constant.

(a) Before compensation

ϕ_1 [°]	V [V]	I [A]	S [KVA]	P [KW]	Q [KVA]	D [KVA]	I_a [A]	I_r [A]	I_d [A]	$\cos \phi_3$	%THD [%]	λ [°]	$\cos \alpha_3$	$\cos \lambda_1$
10.0	220.0	51.8	11.4	10.8	1.9	3.0	49.2	8.6	13.6	0.950	27.3	15.27	0.166	0.262
30.0	220.0	51.8	11.4	9.5	5.5	3.0	43.3	24.9	13.6	0.833	27.3	15.27	0.480	0.262
45.0	220.0	51.8	11.4	7.7	7.7	3.0	35.3	35.3	13.6	0.682	27.3	15.27	0.661	0.262
60.0	220.0	51.8	11.4	5.5	9.5	3.0	25.0	43.3	13.6	0.485	27.3	15.27	0.835	0.262
80.0	220.0	51.8	11.4	1.9	10.8	3.0	8.6	49.2	13.6	0.164	27.3	15.27	0.949	0.262

(b) After non-active component is compensated

ϕ_1 [°]	V [V]	I [A]	S [KVA]	P [KW]	Q [KVA]	D [KVA]	I_a [A]	I_r [A]	I_d [A]	$\cos \phi_3$	%THD [%]	λ [°]	$\cos \alpha_3$	$\cos \lambda_1$
10.0	220.0	49.3	10.8	10.8	0.0	0.5	49.2	0.0	2.1	0.999	4.3	2.48	0.0	0.042
30.0	220.0	43.7	9.6	9.6	0.0	0.7	43.6	0.0	3.1	0.997	7.2	4.10	0.0	0.071
45.0	220.0	37.0	8.1	7.8	0.4	1.9	35.8	1.8	8.9	0.968	25.0	14.05	0.048	0.240
60.0	220.0	27.2	5.9	5.6	0.5	1.8	25.8	2.2	8.3	0.947	32.3	17.93	0.060	0.305
80.0	220.0	12.6	2.7	2.0	0.5	1.7	9.4	2.2	8.0	0.749	82.6	39.58	0.174	0.635

(c) After distorted component is compensated

ϕ_1 [°]	V [V]	I [A]	S [KVA]	P [KW]	Q [KVA]	D [KVA]	I_a [A]	I_r [A]	I_d [A]	$\cos \phi_3$	%THD [%]	λ [°]	$\cos \alpha_3$	$\cos \lambda_1$
10.0	220.0	50.1	11.0	10.8	1.9	0.4	49.3	8.7	2.1	0.984	4.2	2.43	0.173	0.042
30.0	220.0	50.2	11.0	9.5	5.5	0.4	43.5	25.0	2.2	0.863	4.4	2.52	0.498	0.043
45.0	220.0	50.2	11.0	7.8	7.8	0.5	35.4	35.6	2.5	0.706	5.0	2.88	0.709	0.049
60.0	220.0	50.2	11.0	5.5	9.5	0.4	25.0	43.5	2.0	0.500	4.0	2.33	0.866	0.039
80.0	220.0	50.2	11.0	1.9	10.8	0.4	8.7	49.2	2.1	0.174	4.3	2.47	0.980	0.042

Table 2 Results of compensation and power analysis at $\phi_1 = 30^\circ$

	V [V]	I [A]	I_a [A]	I_r [A]	I_d [A]	S [KVA]	P [KW]	Q [KVA]	D [KVA]	2-D Coordinates		3-D Coordinates	
										P.F	%THD [%]	P.F	Height angle [°]
Before compensation	220	51.83	43.30	24.30	13.65	11.40	9.52	5.49	3.00	0.833	27.31	0.835	15.27
After compensation	220	43.79	43.68	0	3.13	9.63	9.60	0	0.69	0.997	7.18	0.997	4.10

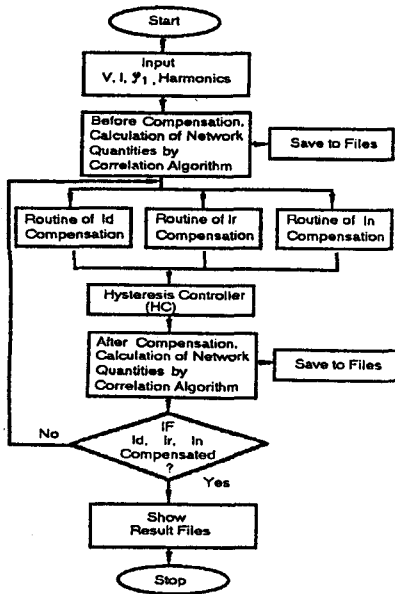
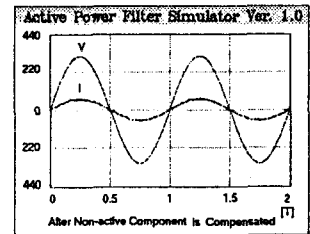
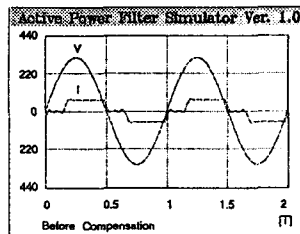
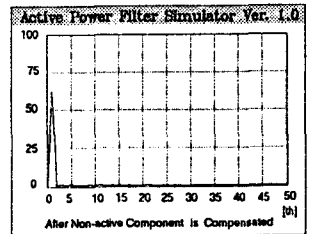
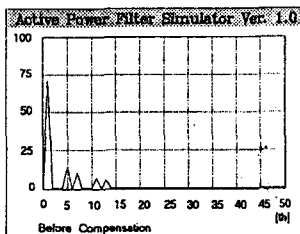


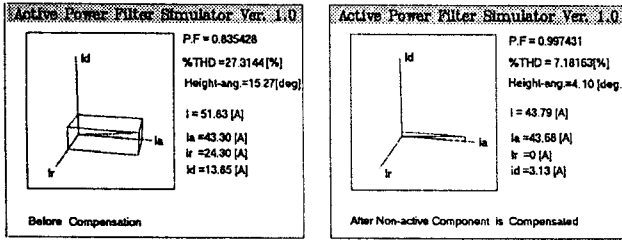
Fig.6 Flow chart of the simulation



time domain



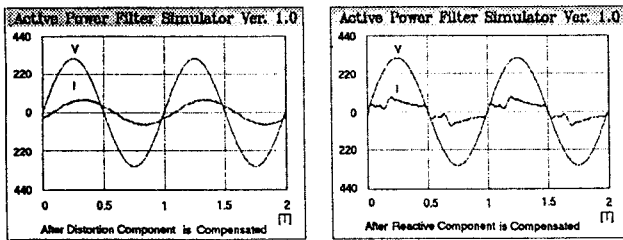
frequency domain



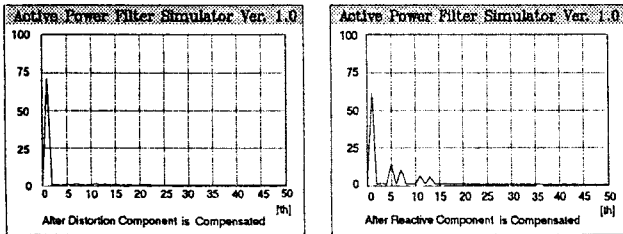
3-D co-ordinate

a) Before compensation b) After compensation

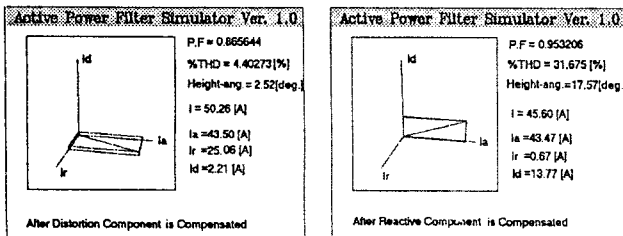
Fig.7 Results of compensation for non-active component at $\varphi_1 = 30^\circ$



time domain



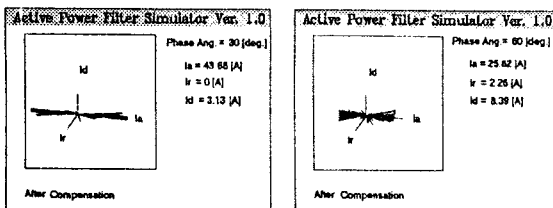
frequency domain



3-D co-ordinate

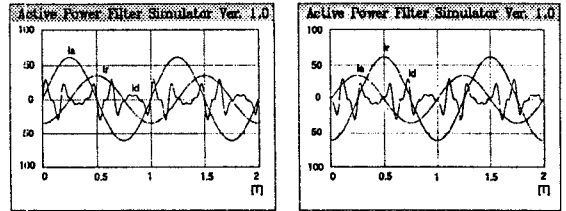
a) After distorted component is compensated b) After reactive component is compensated

Fig.8 Results of compensation for distorted or reactive component at $\varphi_1 = 30^\circ$

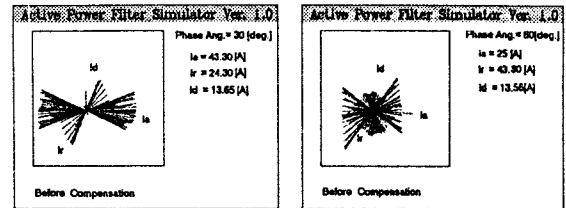


a) In case of 30°

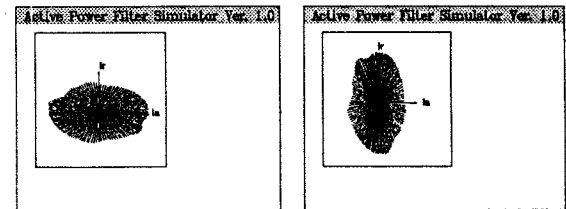
b) In case of 60°



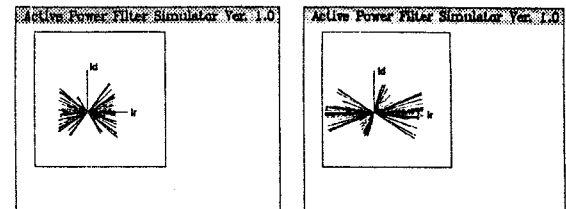
a) Waveforms of decomposed current components



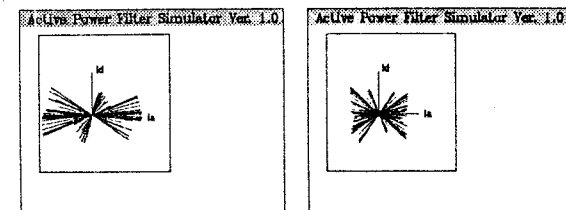
b) Trajectory of current vector on 3-D space co-ordinate



c) Trajectory of current vector on I_a, I_r co-ordinate



d) Trajectory of current vector on I_a, I_d co-ordinate



e) Trajectory of current vector on I_a, I_d co-ordinate

Fig.9 Current waveforms and trajectories of current vector for $\varphi_1 = 30^\circ, 60^\circ$

Fig.10 Trajectory of current vector after compensation