

# THD의 복소 성분을 이용한 고조파 왜곡 환경에서의 전력 계산

論 文

53A-7-4

## Computation of Distortion Power Using Complex THD

崔 種 昱\* · 張 吉 洙\*\*  
(Joung-Ug Choi · Gilsoo Jang)

**Abstract** - This paper introduces a new algorithm to calculate distortion power using complex THD(Total Harmonic Distortion) index. The proposed algorithm involves FFT(Fast Fourier Transform) to compute real and imaginary THDs of voltage and current. Case studies are presented to show the availability of the proposed method.

**Key Words:** Harmonic distortion, THD, distorted power

### 1. 서 론

최근 산업설비는 첨단화, 자동화되면서 과거에 사용하던 설비들에 비해 전원품질변동에 훨씬 민감한 장비들이다. 현대의 산업설비들은 주로 마이크로프로세서에 의한 제어방식을 채택하고 있으며, 전력품질 변동에 민감한 전력전자 소자들로 구성되어 있다. 전력전자 소자들로 구성된 이러한 기기들의 사용은 필연적으로 고조파를 발생시키며, 이 발생된 고조파는 전원계통 측으로 유입되어 전원계통의 고조파 문제를 일으켜 수많은 종류의 설비가 연계되어 있는 전원계통에서 불특정 설비의 오동작, 전력손실의 증가 등의 문제가 발생되고 있다. 또한 설비 중에서 히터의 온도제어를 위해 사용되는 전력 조정기에도 SCR, TRIAC 같은 전력전자소자가 대부분 사용되고 있으며, 특히 일반적으로 사용되는 위상 제어방식은 전력전자 소자의 점호각을 제어하므로 Turn ON/OFF시 고조파를 많이 발생시키고 있다. 이러한 환경 하에서 전력의 측정은 고조파에 의한 오차를 포함하게 되며, 이러한 오차에 대한 분석과 보정을 필요로 하게 된다. 본 논문에서는 고조파 왜곡이 존재하는 상황에서 전력을 계산하는 알고리즘을 제안한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고조파 왜곡 정량화 지수

고조파는 전자회로의 L(코일), C(콘덴서)등 비선형부하에 의한 전류 왜곡에 의해 발생한다. 고조파가 포함이 되면 안

정된 정현파가 일그러진 형태로 나타나게 된다. 이것은 상용전원의 기본파(60Hz)에 대한 정수배인 주파수 성분의 합성으로 분석되며 기본파 전압과 전류에 대한 전체 고조파 성분의 전압과 전류를 전압, 전류 고조파 함유율이라 한다. 고조파 함유율은 어떤 차수의 고조파 성분 실효치의 기본파 성분 실효치에 대한 비율로 다음과 같이 표시된다. 짐적도에 기인한 테스트 문제를 해결할 최적의 해결책으로 여겨지고 있다[3]. 만일 256개의 의사 무작위 패턴이 가해졌을 때, 66개의 결정 패턴만을 가하면 고장 검출률 100%를 보장할 수 있다. 만일 256개의 의사 무작위 패턴이 가해졌을 때, 66개의 결정 패턴만을 가하면 고장 검출률 100%를 보장할 수 있다.

$$\frac{I_n}{I_1} \times 100 (\%) \quad \text{또는} \quad \frac{V_n}{V_1} \times 100 (\%)$$

역율(power factor)을 규정하는 이유는 무효전력을 감소시켜 효율을 증대시킴으로서 전력을 효율적으로 사용하기 위함이다. 역율을 계산하는 기본 식은 다음과 같다.

$$pf = \frac{P}{S} = \cos\theta$$

이러한 왜형파의 질과 고조파 성질을 측정하기 위하여 가장 흔하게 사용하는 지수는 전고조파 함유율 (Total Harmonic Distortion: THD), 고조파 함유율, 그리고 Total Demand Distortion(TDD)로 나타낼 수 있다. 전고조파 함유율 및 고조파 함유율은 파형의 유효한 값을 측정하고, 전압

\* 學生會員 : 高麗大 工大 電氣工學科 碩士

\*\* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2004年 4月 2日

最終完了 : 2004年 6月 16日

과 전류 어느 것에도 적용이 가능하다. 그 외에도 THD(Total Interharmonic Distortion Factor), TSHD(Total subharmonic Distortion)등의 다양한 고조파 지수 들이 있다.

**2.1.1 전고조파 함유율 (Total Harmonic Distortion: THD)[1]**

전고조파 함유율은 전력 시스템에서 왜곡 파형의 고조파 적 요소의 유효한 값의 측정이며 고조파의 영향을 확인하는 데 사용된다. 이 값은 전압과 전류 어느 것에 대하여도 계산이 가능하다.

$$THD = \sqrt{\frac{\text{각 고조파 크기 제곱의 합}}{\text{기본파 크기의 제곱}}} \times 100 \%$$

전고조파 함유율을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \times 100 \%$$
 (1)

단,  $M_h$  : 제 h 차 고조파 성분의 실효치

$M_1$  : 기본파 성분의 실효치

인던턴스에 적합한 THD는

$$THD_{Ind} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^h \left(\frac{M_h^2}{h^\alpha}\right)}}{M_1} \times 100 \%$$

단,  $\alpha$  : 1과 2사이의 값

이고, 커패시턴스에 적합한 THD는 아래와 같다.

$$THD_{Cap} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^h (h \times M_h^2)}}{M_1} \times 100 \%$$

위의 식에서와 같이 전고조파 함유율은 고조파 성분의 실효치와 기본파 성분 실효치의 비로서 나타내며 고조파 발생의 정도를 나타내는데 많이 사용된다. 왜곡파형의 실효치를 나타내어 보면 다음과 같다.

$$M_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_n} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} M_h^2\right)}$$
 (2)

왜곡 파형의 실효치는 위 식(2)에서 보여 지는 것처럼 제곱의 합의 제곱근이다.

전고조파 함유율은 아래의 식에서 볼 수 있는 것처럼 실효치와의 관계를 가진다.

$$RMS = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} M_n^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2}$$
 (3)

전고조파 함유율 수치는 전압의 고조파 왜곡을 설명하기 위하여 가장 많이 사용된다. 고조파 전압은 샘플의 어느 한 순간에서 기본파 성분의 값에 거의 항상 인용된다. 기본 전압이 단지 몇 퍼센트 만큼만 변화하기 때문에, 전압 THD는 중요한 값이 된다.

한주기 동안 THD의 변화는 시스템에서 비선형 부하 동작을 나타내는 명확한 패턴을 따른다. 그림 1 은 하루의 순환적 패턴이 명백한 곳에서 1주일의 주기에 대한 전압 THD의 변화를 보여준다[2].

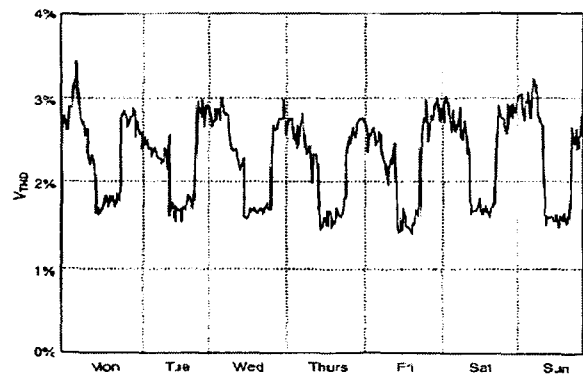


그림 1. 일주일 동안의 전압 THD의 변화

Fig. 1. THD variation during 1 week

밤이나 이른 아침에는 선형 부하의 양보다 비선형 부하의 양이 상대적으로 높기 때문에 고전압 THD는 밤이나 이른 아침에 발생한다. 1주일의 관찰주기는 그것이 보편적이고 실용적인 측정 결과를 얻기 위한 가장 짧은 기간이기 때문에, THD 패턴을 보이는데 유용하다.

**2.1.2 Total Demand Distortion (TDD)[1]**

고조파에 의한 전류 왜곡은 지금까지 논의되어 온 것처럼 THD 에 의해서 특성화 될 수 있지만, 고조파 전류의 THD 는 가끔 문제가 되는 경우가 있다. 작은 전류는 커다란 THD 값을 가지지만, 시스템에 중요한 위협을 주지는 않는

다. 예를 들어 많은 속도 조절이 가능한 소자들은 그것들이 매우 작은 부하에서 동작할 때, 입력 전류에 대하여 높은 THD 값을 나타낼 것이다. 이것은 상대적 전류의 왜곡이 크더라도 고조파 전류의 크기가 작기 때문에 중요한 고려대상이 되지 못한다. 그러므로 전류의 고조파 왜곡을 분석하는데 있어 기본파 성분보다는 공급되는 부하전류의 최대값의 성분에서 THD값을 구함으로써 이런 문제를 해결하려는 시도를 하고 있다. 이것은 Total Demand Distortion(TDD)라고 하고 아래와 같이 정의한다.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{h_{max}} I_k^2}}{I_L} \quad (4)$$

$I_L$ 은 PCC (point of common coupling)에서 측정된 기본 주파수 성분에서 공급되는 부하전류의 최대값이다.  $I_L$ 을 측정하는 방법에는 두 가지가 있다. 시스템에 이미 있는 부하에 이전의 12개월 동안에 공급된 전류의 최대값의 평균으로 계산될 수 있다. 새로운 설비에 대하여  $I_L$ 는 예상되는 부하의 윤곽에 기초하여 측정되어야만 한다.

### 2.1.3 변위역율(Displacement Power Factor : DPF)과 실역율 (True Power Factor : TPF)[3]

변위역율은 고전 역율삼각법에 의해 간단하게 구할 수 있다. 즉, 역율은 kW와 kVA의 비로 나타낼 수 있다. 변위역율에서는 단지 기본주파수 성분의 kW<sub>1</sub>와 kVA<sub>1</sub>의 비로 나타낸다.

$$DPF = \frac{kW_1}{kVA_1} = \cos \theta \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 는 역율각이다.

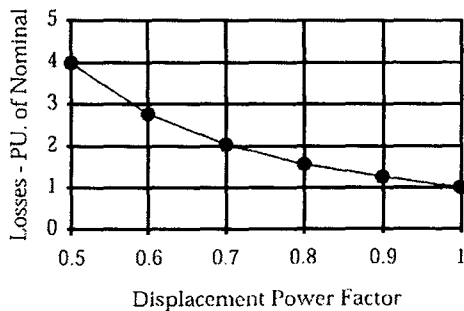


그림 2. 변위역율에 따른 손실  
Fig. 2. Losses according to displacement PF

그러나, 고조파 왜곡을 포함한 경우에는 고조파 왜곡 voltamperes를 포함한 kVA를 사용해서 실역율을 표시해야 한다. 여기에서 kVA값은 기본주파수 성분의 kVA<sub>1</sub>보다 높은 값을 가지고 그에 비해 유효전력의 왜곡에 의한 증가는 많지 않다. 그러므로 변위역율은 실역율보다 같거나 큰 값을 가지게 된다.

실역율은 식(6)과 같이 정의되고 계통에서의 부하가 선형적인 전압, 전류 특성을 가지고 고조파를 무시한 이상적인 정현파의 경우 실역율과 변위역율은 같게 된다.

$$TPF = \frac{kW}{kVA} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (6)$$

식 (3)를 이용하여  $V_{rms}$  와  $I_{rms}$ 를 구하고 이를 식 (6)에 대입하여 간단한 계산을 거치면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$TPF = \frac{P_{avg}}{V_{1rms} I_{1rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (7)$$

이 식은 위의 식(6)과 같은 값을 THD값을 이용하여 정리한 식이며 식(7)에서 다음을 가정하면 실역율의 근사형을 구할 수 있다.

1. 대부분의 경우, 평균 전력이 기본파 보다 큰 고조파의 기여는 작으므로  $P_{avg} \approx P_{1avg}$  로 가정한다.
2.  $THD_V$ 가 10% 보다 작은 경우가 많으므로  $THD_V \approx 0$ ,  $V_{rms} \approx V_{1rms}$  라고 가정을 한다.

$$TPF = \frac{P_{1avg}}{V_{1rms} I_{1rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} = DPF \cdot pf_{dist} \quad (8)$$

변위역율이  $DPF \leq 1$  이므로 비정현파에서 실역율이 아래 식과 같은 최대를 가짐을 보여준다.

$$TPF \leq pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} \quad (9)$$

식 (9)을 기반으로 그려진 그림 3 은 전력전자소자, 특히 단일위상부하의 실역율 변동을 나타낸다.

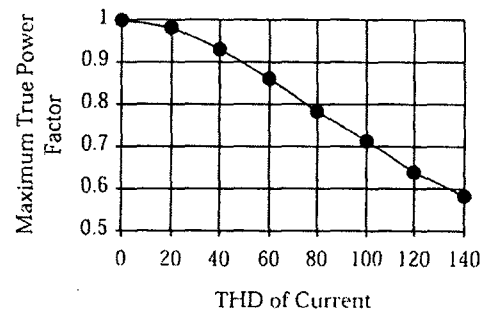


그림 3. 전류의 THD에 따른 최대 실역율  
Fig. 3. Maximum true PF according to current THD

컴퓨터 및 가정용 오락 기구와 같은 단일 위상 전력 전자 소자는 거의 100%에 가까운 높은 전류 왜곡을 가지는 경향이 있다. 따라서, 이 경우 변이역율이 거의 1이라고 하더라도, 실역율은 일반적으로 0.707보다 작다.

2.2 고조파 왜곡 환경에서의 전력 계산

2.2.1 기본적인 전력 계산 방법

순시 전력을 전압  $v(t) = V_1 \cos(\omega_0 t + \delta_1)$  과 전류  $i(t) = I_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1)$  를 사용하여 표현하면 다음과 같다. 고조파 왜곡이 없는 경우 전압과 전류의 크기  $V$  와  $I$  는 기본파의 크기  $V_1$  과  $I_1$  이 된다.

$$\begin{aligned}
 p(t) &= v(t) \cdot i(t) \\
 &= V \cos(\omega t + \delta) \cdot I \cos(\omega t + \theta) \\
 &= \frac{VI}{2} \cos(2\omega t + \theta + \delta) + \frac{VI}{2} \cos(\delta - \theta)
 \end{aligned} \tag{10}$$

위 식에서 유효(평균) 전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{VI}{2} \cos(\theta - \delta) = V_r I_r \cos(\theta - \delta) \tag{11}$$

$$Q = \frac{VI}{2} \sin(\theta - \delta) = V_r I_r \sin(\theta - \delta) \tag{12}$$

여기에서 무효전력을 구한 후 역율을 이용한 무효전력  $Q'$  을 구하여 원래의 무효전력과 비교해 본다.

$$Q' = Q \sqrt{1 - pf^2} \tag{13}$$

위 식에서  $V_r$  과  $I_r$  은 고조파 왜곡 환경에서는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_r &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2} \\
 I_r &= \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}
 \end{aligned}$$

2.2.2 알고리즘 : 복소수 THD의 사용

고조파 왜곡 환경 하에서 각 전압과 전류에 대해 FFT (Fast Fourier Transform)을 수행하면 결과는 각 고조파 성분에 대해 실수부와 허수부로 구성된 복소수 형태이므로 각 각을 구분하여 고조파 왜형율을 구할 수 있다.

전압의 실수 THD와 허수 THD를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$THD_{V_{real}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{nreal}^2}}{V_1} \tag{14}$$

$$THD_{V_{imag}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{nimag}^2}}{V_1}$$

전류의 실수 THD와 허수 THD를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$THD_{I_{real}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nreal}^2}}{I_1} \tag{15}$$

$$THD_{I_{imag}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nimag}^2}}{I_1}$$

THD를 실수와 허수부로 구분하여 계산하고, 이를 이용하여 고조파 왜곡이 반영된 전압과 전류 표현식을 구해 고조파 왜곡 환경하에서의 전력을 계산한다.

기존의 THD와 여기서 제안된  $THD_{real}$ 과  $THD_{imag}$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$THD^2 = THD_{real}^2 + THD_{imag}^2 \tag{16}$$

직교필터를 통해서 얻어진 전압과 전류의 기본파 값에 FFT를 통해서 얻어진 전체 고조파 왜형율을 이용하여 식 (3)을 복소수 형태로 확장한 아래 식과 같은 고조파의 영향을 고려한 전압  $V_D$  와 전류  $I_D$  를 계산할 수 있다.

$$V_D = V_{1real} \sqrt{1 + THD_{V_{real}}^2} + j V_{1imag} \sqrt{1 + THD_{V_{imag}}^2} \tag{17}$$

$$I_D = I_{1real} \sqrt{1 + THD_{I_{real}}^2} + j I_{1imag} \sqrt{1 + THD_{I_{imag}}^2} \tag{18}$$

왜형 전압과 전류를 이용하여 유효전력과 무효전력을 계산할 수 있으며, 이와 같은 왜형율을 고려한 전력(distortion power)은 비선형 부하가 발생하는 고조파의 영향을 반영한 것이다.

$$\begin{aligned}
 P_D &= V_{1real} \sqrt{1 + THD_{V_{real}}^2} \times I_{1real} \sqrt{1 + THD_{I_{real}}^2} \\
 &+ V_{1imag} \sqrt{1 + THD_{V_{imag}}^2} \times I_{1imag} \sqrt{1 + THD_{I_{imag}}^2}
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$Q_D = -V_{i,real} \sqrt{(1 + THD_{V_{real}}^2)} \times I_{i,imag} \sqrt{(1 + THD_{I_{imag}}^2)} + I_{i,real} \sqrt{(1 + THD_{I_{real}}^2)} \times V_{i,imag} \sqrt{(1 + THD_{V_{imag}}^2)} \quad (20)$$

위에서 구한  $P_D$  값을 이용하여 일반적인 역율을 구하는 식을 이용하여  $P_D$ 에 의한 새로운 왜곡을 고려한 역율을 구해 보면 다음과 같다.

$$PF_D = \frac{P_D}{S} \quad (21)$$

그리고 식 (7)에 복소수 THD를 역율에도 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$TPFD = \frac{P_D}{V_{i,real} I_{i,real}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_{V_{real}}^2 + THD_{I_{imag}}^2} \sqrt{1 + THD_{I_{real}}^2 + THD_{V_{imag}}^2}} \quad (22)$$

본 예에서는 데이터 처리의 실시간성을 보장하기 위하여 분석 가능한 고조파의 차수를 실제 전력계통에서 주도적인 영향을 미치는 고조파로 제한하여 적용하였다.

### 2.3 시험 계통을 통한 검증

계통의 전압과 전류가 고조파를 포함하는 비정현파 상태를 고려하면 주요한 영향을 미치는 고조파는 일반적으로 세 번째, 다섯 번째, 그리고 일곱 번째 고조파들이다. 이와 같은

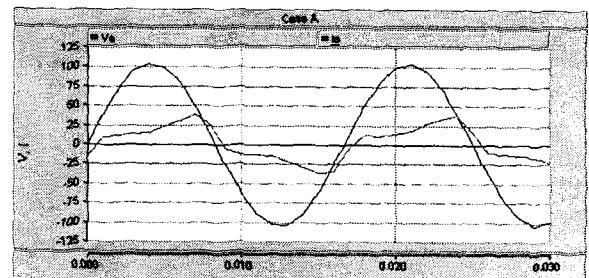
표 1. 전압과 전류 위상 ( $V = 113.65 \text{ V}$ ,  $I = 16.23 \text{ A}$ ) [4]

Table 1. Voltage and current ( $V = 113.65 \text{ V}$ ,  $I = 16.23 \text{ A}$ )

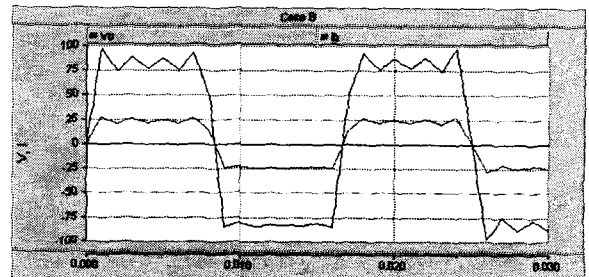
Case	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	
A	$V_A$	$113.65 \angle 0^\circ$	0	0	
	$I$	$15 \angle -30^\circ$ (12.99-j7.5)	$5.8 \angle 0^\circ$	$2 \angle 0^\circ$	$1 \angle 0^\circ$
B	$V_B$	$105 \angle 0^\circ$	$35 \angle 0^\circ$	$21 \angle 0^\circ$	$15 \angle 0^\circ$
	$I_B$	$15 \angle 0^\circ$	$5 \angle 0^\circ$	$3 \angle 0^\circ$	$\frac{15}{7} \angle 0^\circ$
C	$V_C$	$105 \angle 0^\circ$	$35 \angle 0^\circ$	$21 \angle 0^\circ$	$15 \angle 0^\circ$
	$I_C$	$15 \angle -30^\circ$ (12.99-j7.5)	$5 \angle -90^\circ$ (0-j5)	$3 \angle -150^\circ$ (-2.598-j1.5)	$\frac{15}{7} \angle 150^\circ$ (-1.856-j1.07)
D	$V_D$	$105 \angle 0^\circ$	$40.82 \angle 180^\circ$ (-40.82+j0)	0	$15 \angle 0^\circ$
	$I_D$	$15 \angle -30^\circ$ (12.99-j7.5)	0	$5.44 \angle -60^\circ$ (2.72-j4.71)	$3 \angle -30^\circ$ (2.598-j1.5)

이유로 시험계통에서는 3, 5, 7고조파만을 고려하여 각 Case를 계산 하였다. 이는 계산을 간단하게 하는 데도 도움을 준다. 제안한 알고리즘에 의해 계산된 값들을 기본적인 전력 계산방법에 의한 값과 각각 고조파 성분의 크기와 위상이 조금씩 다른 4가지 경우에 대해 비교하였다.

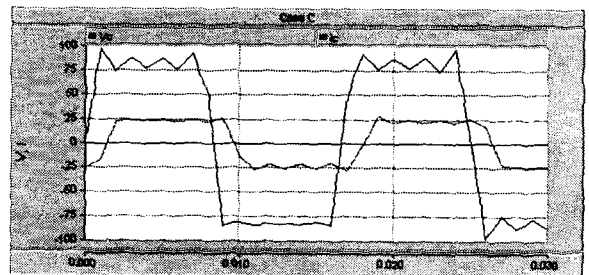
Case A는 전압이 실효값과 같은 크기를 가진 기본파 성분만을 가지고 있고 전압의 고조파 성분이 없다고 가정한 경우이다. Case B는 전압과 전류가 고조파 성분은 가지고 있지만 전압과 전류의 위상이 동일한 경우이고, Case C는



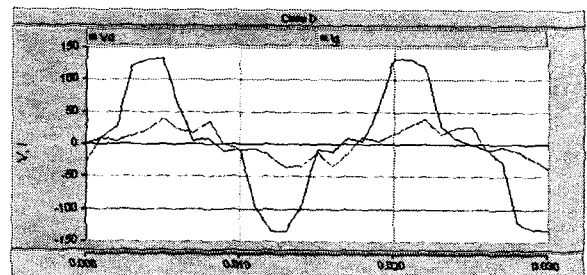
(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C



(d) Case D

그림 4. 각 경우의 전압 전류파형

Fig 4. Voltage waveforms

전압과 전류가 고조파 성분을 가지고 있지만 전압의 경우는 위상차이가 없고 전류의 경우에는 각기 다른 위상을 가지고 있는 경우이다. 마지막으로 Case D 는 전압과 전류가 고조파를 포함하고 각각 다른 위상을 가지고 있는 경우를 가정하였다. 고조파가 포함된 네가지 각 경우의 전류와 전압의 파형을 살펴보면 아래의 그림 3 과 같다.

그림 4 에서 높은 최대 값을 가지는 실선이 전압을 나타내고 낮은 값을 가지는 선은 전류를 나타낸다. 위의 그림에서 볼 수 있듯이 고조파가 포함된 전류와 전압의 파형은 많이 왜곡 되어 있다.

각 경우의 조건은 조금씩 차이가 나지만 기본적으로 전압과 전류의 실효값은 전압은 113.65 V, 전류는 16.23 A로 동일한 값을 가지도록 하였다.

표 1의 네 가지 경우의 전압과 전류를 표시하면 다음과 같다.

$$V_A(t) = \sqrt{2}[113.65 \cos(\omega_0 t)]$$

$$I_A(t) = \sqrt{2}[15 \cos(\omega_0 t - 30) + 5.8 \cos(3\omega_0 t) + 2 \cos(5\omega_0 t) + 1 \cos(7\omega_0 t)]$$

$$V_B(t) = \sqrt{2}[105 \cos(\omega_0 t) + 35 \cos(3\omega_0 t) + 21 \cos(5\omega_0 t) + 15 \cos(7\omega_0 t)]$$

$$I_B(t) = \sqrt{2}[15 \cos(\omega_0 t) + 5 \cos(3\omega_0 t) + 3 \cos(5\omega_0 t) + \frac{15}{7} \cos(7\omega_0 t + 150)]$$

$$V_C(t) = \sqrt{2}[105 \cos(\omega_0 t) + 35 \cos(3\omega_0 t) + 21 \cos(5\omega_0 t) + 15 \cos(7\omega_0 t)]$$

$$I_C(t) = \sqrt{2}[15 \cos(\omega_0 t - 30) + 5 \cos(3\omega_0 t - 90) + \cos(5\omega_0 t - 150) + \frac{15}{7} \cos(7\omega_0 t + 150)]$$

$$V_D(t) = \sqrt{2}[105 \cos(\omega_0 t) + 40.82 \cos(3\omega_0 t) + 15 \cos(7\omega_0 t)]$$

$$I_D(t) = \sqrt{2}[15 \cos(\omega_0 t - 30) + 5.44 \cos(5\omega_0 t - 60) + 3 \cos(7\omega_0 t - 30)]$$

위의 식으로부터 전압과 전류의 실효값과 유효전력 및 무효전력을 구하고 역율을 이용하여 Q값을 보정한 Q'을 계산한다. 계산된 결과는 아래의 표 2 에 보여진다.

이제 이 논문에서 제시하는 알고리즘을 이용하여 전압과 전류의 THD값의 복소성분을 계산하고, 이를 이용하여 식(17), (18)에 의해 고조파 왜곡이 고려된 새로운 전압과 전류 값을 계산하고, 식(19), (20)에 의해 유효전력과 무효전력의 값을 계산한다. 이 결과는 표 3 에 나타내었다.

표 2. 기본적인 전력계산 결과  
Table 2. Power calculation results

	Case A	Case B	Case C	Case D
$V_1$	113.65∠0°	105∠0°	105∠0°	105∠0°
$I_1$	15∠-30°	15∠0°	15∠-30°	15∠-30°
$P_1$	1476.36	1575	1363.99	1363.99
$V_{rms}$	113.65	113.65	113.65	113.65
$I_{rms}$	16.2370	16.24	16.24	16.24
$P$	1476.36	1845.14	1281.59	1402.96
$Q$	852.38	0	977.93	810
$S$	1845.34	1845.14	1845.14	1845.17
$pf$	0.8	1.0	0.69	0.76
$Q$	1107.20	0	1327.57	1198.57

표 3. 복소수 THD를 사용한 알고리즘을 이용한 계산  
Table 3. Results using complex THD

	Case A	Case B	Case C	Case D
$THD_{Vreal}$	0	0.41	0.41	0.41
$THD_{Vimag}$	0	0	0	0
$THD_V$	0	0.41	0.41	0.41
$THD_{Ireal}$	0.41	0	0.21	0.25
$THD_{Imag}$	0	0.41	0.36	0.33
$THD_i$	0.41	0.41	0.41	0.41
$V_D$	113.65	113.65	113.65	113.65
$I_D$	14.06 + j7.5	16.24	13.28 - j7.96	13.39 - j7.90
$I_D$	(15.94∠28.07)		(15.48∠-30.93)	(15.55∠-30.53)
$P_D$	1598.06	1845.14	1509.37	1522.04
$Q_D$	852.38	0	904.55	897.46

위의 표 2 의 기본적으로 정의에 의한 계산과 표 3 의 제시한 알고리즘에 의해 계산되어진 값을 이용하여 위에서 설명된 역율을 구하는 식을 이용하여 각 경우의 역율을 계산해 보았다.

표 4. 일반적인 경우와 제시한 알고리즘을 적용한 역율과의 비교

Table 4. Comparison between conventional and proposed methods

역율		Case A	Case B	Case C	Case D	
DPF		0.866	1.0	0.866	0.866	
TPF		0.8	1.0	0.695	0.76	
복소수 THD에 의한 계산	$P_{avg}$ 사용	TPF	0.8	1.0	0.695	0.76
	$P_D$ 사용	$TPF_D$	0.866	1.0	0.818	0.825
		$PF_D = \frac{P_L}{S}$	0.866	1.0	0.818	0.825

표 4에 역율에 대한 결과를 표시 하였다. 제시한 알고리즘을 이용한 왜곡하의 역율( $PF_D$ )은 변위역율(DPF) 값보다 작고 실역율(TPF) 값보다는 크거나 같은 다음의 결과를 가짐을 알 수 있다.

$$TPF \leq PF_D \leq DPF$$

이제 기본적인 전력계산에 의한 결과와 새롭게 제시한 알고리즘에 의해 계산된 값을 참고문헌[4]에 제시되어 있는 값들과 비교해 보도록 한다. 아래 표 5에 나타내져있는 값들은 참고문헌에서 제시되어 있는 전력 값들이다.

표 5. 전압과 전류의 실효값이 같지만 파형이 다른 4가지 회로의 전력 값[4]

Table 5. Power values of 4 cases

Magnitude		Case A	Case B	Case C	Case D
Active	$P(W)$	1476	1845	1282	1403
Budeanu	$Q_B(Var)$	852	0	978	810
Shepherd	$S_X(VA)$	852	0	1046	811
Sharon	$Q_S(Var)$	852	0	1046	870
Emanuel	$Q_1(Var)$	852	0	788	788
Fryze	$Q_f(Var)$	1107	0	1327	1198
Budeanu	$D(VA)$	707	0	897	883
Apparent	$\frac{S(VA)}{PF}$	1845 / 0.80	1845/1	1845 / 0.695	1845 / 0.76

표 5의 값들은 각 경우의 미리 정의되어 있는 전력 값들이다[4]. 이 값들은 유효전력 P, 무효전력  $Q_B$ , 피상무효전력

$S_x$ , 무효전력  $Q_s$ , 기본성분의 무효전력  $Q_1$ , Fryze의 무효전력  $Q_f$ , 왜곡전력 D, 피상전력 S, 그리고 또한 역율 PF 이다.

간단히 살펴보면 왜곡이 포함된 피상전력을 세 개의 직교하는 성분으로 나눌 수 있다.

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2 = P^2 + Q_F^2$$

즉 Fryze의 무효전력  $Q_f$ 는 기본적인 피상전력의 무효전력에 왜곡전력을 합한 것으로 다음과 같다.

$$Q_F^2 = Q_B^2 + D^2$$

이 표에서의 전압과 전류의 위상차에 의해 무효전력의 값들이 결정되므로 실제로 비교해 볼 수 있는 값들은 Case A, C, D의 서로 차이 나는 값들이다. 위의 세 개의 표 2, 3, 5에서 유효전력 값과 무효전력 값들을 비교해 보면 기본적인 전력계산에서의 유효전력 P와 무효전력 Q는 표 5의  $P(W)$ 와  $Q_B(Var)$ 와 거의 같은 당연한 결과를 얻고, 역율에 의해 보정된 무효전력  $Q'$ 는 표 5의 Fryze의 무효전력  $Q_f(Var)$ 와 거의 비슷한 값을 가진다.

본 논문에서 제시한 복소수 THD를 이용한 전력계산의 새로운 알고리즘에 의해 계산된 왜곡을 포함한 유효전력  $P_D$ 의 값은 Case A, C, D에서 기본적인 계산에 의한 유효전력 P보다 높은 값을 가지고 무효전력은 Case C와 D에서 가까운 값을 가진다. Case A에서 전압에 고조파가 포함되지 않고 전류에만 고조파를 포함 시킨 경우에서 무효전력은 왜곡전력 D 보다 낮고 기본적인 전력계산에 의한 무효전력 값과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 또 새로운 역율을 계산해 보면 이는 실역율 보다는 크고 변위역율 보다는 작은 값을 얻을 수 있었다. 이는 왜곡전력(distortion power)에 의한 전력 변동이 유효전력에 반영된 결과로 유효전력의 값은 커지고 이에 따라 실역율이 향상되며 무효전력의 값은 조건에 따라 크거나 작은 결과를 확인 할 수 있다.

### 3. 결 론

고조파 왜곡에 의한 전력품질 문제가 점차 큰 문제로 대두 될 것이며 고조파 왜곡이 포함된 전력을 정확하게 계산하는 것은 쉽지 않다. 이에 관하여 다양한 연구가 지속되고 있고 본 논문에서는 푸리에 변환을 이용한 THD의 복소 성분을 이용하여 전압과 전류를 실수 부분과 허수 부분으로 분해하고, 이를 이용해 각각을 조합하여 새로운 고조파 왜곡을 포함한 전압과 전류 값을 계산하여 유효전력과 무효전력

을 계산하는 방법을 제시하였다. 4가지 Case의 예를 통해 기본적인 전력 계산 값과 새롭게 제시한 알고리즘에 의한 전력 계산 방법을 비교 하였으며, 고조파 왜곡이 전력계산에 반영되었음을 확인하였다.

제안된 알고리즘을 전력 계산에 적용하기 위해서 왜곡전력의 적절한 유효전력 반영을 위한 알고리즘 보완이 진행 중이다.

**감사의 글**

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행 되었음.

**참 고 문 헌**

- [1] IEEE 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (ANSI)
- [2] Roger C.Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H.Wayne Beaty "Electrcal Power Systems Quality".
- [3] W. Mack Grady, Robert J. Gilleskie "HARMONICS AND HOW THEY RELATE TO POWER FACTOR" Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA '93), San Diego, CA, November 1993.
- [4] J.Arrillaga, N.R.Watson, S.Chen "POWER SYSTEM QUALLTY ASSESSMENT".

**저 자 소 개**



**최 종 우 (崔 種 昱)**

1973년 1월 19일생.  
2004년 고려대 대학원전기공학과 석사과정 졸업. 현재 LG 산전(주) 근무.  
Tel : (02) 3660-7231  
Fax : (02) 3660-7233  
E-mail : gjang@korea.ac.kr



**장 길 수 (張 吉 洙)**

1967년 10월 26일생.  
현재 고려대학교 전기공학과 부교수.  
Tel : (02) 3290-3246  
Fax : (02) 3290-3692  
E-mail : gjang@korea.ac.kr