

## On-line Harmonic Distortion Index for Power Quality Assessment

張 吉 洙\* · 宋 和 昌\*\* · 李 炳 峻\*\*\*  
(Gilsoo Jang · Hwachang Song · Byongjun Lee)

**Abstract** - This paper introduces a new online index to quantify the harmonic distortion. The proposed index based on VI product can represent the harmonic distortion of both voltage and current, and it includes the effect of interharmonic distortion. Also, the new index is suitable to online harmonic distortion evaluation since it only requires the r.m.s. (root mean square) value and fundamental frequency value of the signals. Case studies are presented to show the availability of the proposed index using the comparison with the THD (Total Harmonic Distortion).

**Key Words** : Harmonic Distortion, THD, Interharmonics, Power Quality

### 1. 서 론

산업의 고도화와 함께 안정된 전기 공급의 중요성은 더욱 커져가고, 이에 대한 전력회사의 관심과 투자가 계속 되어 왔다. 순간 정전에 의해서도 큰 사회적 비용이 초래되는 현실에 비추어 정전의 방지와 정전 시간의 감소를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 함께 전력계통에서 사용되는 전력전자 설비 및 수용가 기기들에 의한 전력품질의 저하는 전기 설비 손실의 증가 및 기기의 열화 등과 같은 문제를 일으키고 정밀한 측정 기기에는 큰 오차를 발생시키게 된다. EPRI 자료[1]에 의하면 미국에서 전력품질의 저하에 의해 연간 300억불의 손실이 발생했다고 하며 우리나라의 경우 전기사업법의 국회 통과로 가시화되고 있는 전력산업의 구조개편에 의해 소매 단계의 경쟁이 도입될 경우 이러한 전력품질 관련 문제는 전기 가격과 함께 소비자의 전력회사 선택을 결정할 중요한 요소로 대두될 전망이어서 전력품질의 해석 및 개선을 위한 연구가 요구된다.

전력품질의 해석을 위해서는 무엇보다도 표준화된 비교 기준의 존재가 필요하며, 이를 위한 전력품질 정량화 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-5] 고조파 문제의 경우 THD (Total Harmonic Distortion)에 의해 파형의 왜곡 정도가 정량화 되어 왔으며, 이 지수의 실제 적용 시 발생한 문제점을 개선한 새로운 지수가 개발되고 있다. 하지만, THD 및 유사 지수들은 주기함수에 국한하여 적용 가능하다는 점과 정

수 배의 고조파에만 국한된다는 점[3], 그리고, 직관과는 다른 결과를 줄 수 있다는 근본적인 단점을 여전히 가지고 있다. 이와 함께 삼상 불평형 회로에 대한 THD 적용 기준도 수립되어 있지 않다. 따라서, 본 논문에서는 기존 THD 지수의 이러한 문제점들을 보완하고 삼상 불평형 회로에 대한 고조파에 의한 왜곡을 정량화 할 수 있는 새로운 고조파 정량화 지수를 개발하여 그 유용성을 검증하였다. 또한, 궁극적으로 구현되어야 할 전력품질 온라인 감시를 위해 개발된 지수의 온라인 적용 방안도 제시하였다.

### 2. Interharmonic 정량화 지수의 개발

#### 2.1 기존 고조파 정량화 지수

일반적으로 사용되고 있는 고조파 정량화 지수인 THD의 정의식은 다음 식 (1)과 같다.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad \text{또는} \quad THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

식이 의미하는 것은 기본 주파수 전압(전류)의 크기에 대한 기본 주파수의 정수 배를 가지는 전압(전류)들 크기를 기하 평균한 값의 상대적인 크기이며, 이 값이 클수록 순수 정현파 파형을 기준으로 고조파에 의해 파형의 왜곡(waveform distortion)이 심하다는 것을 의미하고, 보통 기본 주파수의 50차까지 계산에 포함시킨다. 부하의 특성(inductive 또는 capacitive)에 따라 THD가 적절하게 파형의 왜곡을 표현하지 못하는 문제가 있어, 이러한 문제의 해결을 위해 다음 식 (2)와 (3)에 나타난  $THD_{ind}$ ,  $THD_{cap}$ 가 제시되었다. 또한 부하 정도 (경부하 또는 중부하)에 따라 기본파 전류의 크기

\* 正 會 員 : 高麗大 電氣 · 電子 · 電波工學部 助教授 · 工博  
 \*\* 準 會 員 : 高麗大 大學院 電氣工學科 博士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 高麗大 電氣 · 電子 · 電波工學部 副教授 · 工博  
 接受日字 : 2000年 4月 6日  
 最終完了 : 2001年 8月 9日

가 크게 변동되어 이에 따라 THD가 고조파의 영향을 확대 해석하게 만드는 문제를 해결하기 위해 기본파 정격 전류를 사용하는 식(4)의 TDD[6]가 제안되어 사용되고 있다.

$$THD_{ind} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} \frac{V_n^2}{n^\alpha}}}{V_1} \quad (2)$$

$$THD_{cap} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} (n * V_n^2)}}{V_1} \quad (3)$$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_{rated}} \quad (4)$$

제시된 이러한 지수들은 전압이나 전류가 주기 함수라는 전제에 기초한 것으로 비 주기함수에 대해서는 윈도우 함수가 이용되어야 하고 이에 따른 spectral 손실 등의 발생으로 정확한 계산이 이뤄지지 못할 수 있다. 또한 기본 주파수의 정수 배 고조파만이 계산에 포함됨으로써 기본파의 유리수 배를 갖는 interharmonic에 대해서는 적용할 수 없다는 큰 단점을 갖고 있다.

주기적인 시변 부하(periodical time varying loads)와 다 단계의 스위칭 기능을 가진 회로 등에 의해 발생하는 interharmonics[5]는 원격제어계통의 이상 동작, 싸이리스터를 사용한 기기에서의 이상 점화, 모니터나 조명기기에서의 플릭커 현상 등의 원인이 되고 있다. Interharmonics와 subharmonics에 대해서는 다음 식과 같이 파형의 왜곡 정도를 표현하고 있으며, 식 (5)와 (6)에 나타난 TIHD(Total Interharmonic Distortion)와 TSHD(Total Subharmonic Distortion)의 계산을 위해서는 많은 데이터 빈(bin)을 확보해야 하므로 온라인 적용에는 적합하지 않다

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2}}{V_1} \quad (5)$$

여기서,

- i : 고려할 interharmonic의 총 개수
- n : Subharmonic을 포함하는 주파수 빈의 총수

$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^S V_s^2}}{V_1} \quad (6)$$

여기서,

- S : 기본 주파수보다 낮은 곳에 있는 주파수 빈의 총수

### 2.2 에너지 개념을 이용한 고조파 정량화 지수의 제안

고조파의 영향을 전압과 전류 중 하나에 국한하여 표현하여 실제적인 영향이 간과될 수 있다는 단점을 보완하기 위해 전압과 전류 파형 모두에 대한 고조파 왜곡을 표현하고, interharmonics가 동시에 고려될 수 있는 새로운 지수 THED(Total Harmonic Energy Distortion)를 제안한다 .

$$THED = \frac{V_{rms} I_{rms} - V_1 I_1}{V_{rms} I_{rms}} \quad (7)$$

일반적으로 이용되는 THD의 지수와 비교했을 때, 제안된 지수는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- (1) 하나의 변수 즉, 전압 또는 전류만을 이용하지 않는다.
- (2) 기본 주파수 성분과 r.m.s. 값을 이용한다. 기본 주파수 성분만을 구함으로 인하여 다른 주파수 성분을 구하는데 필요한 계산시간을 감소시킬 수 있다.
- (3)  $V_{rms} I_{rms}$ 로 계산되는 피상전력에서 기본 주파수 성분에 해당되는  $V_1 I_1$ 의 피상전력의 차이를 구함으로써 기본주파수 외의 모든 고조파에 의한 피상전력을 구하기 때문에 subharmonics와 interharmonics의 경우에도 잘 적용될 수 있다.

삼상 불평형 회로에서 계산된 지수의 값은 각 상에서 다를 수 있으며, 이 경우 전체 삼상 회로에서의 고조파 왜곡에 의한 영향을 정량화하기 위해서 식 (8)과 같은 지수를 제안한다.

$$THED_{tot} = \sqrt{THED_a^2 + THED_b^2 + THED_c^2} \quad (8)$$

여기서,

$$THED_i = \frac{V_{i,rms} I_{i,rms} - V_{i,1} I_{i,1}}{V_{i,rms} I_{i,rms}}$$

THED 지수의 계산에서의 문제는 어떻게 기본주파수 성분을 빨리 구하는가가 온라인 적용 가능 여부를 결정하게 되며 삼상에서 평형 기본주파수 성분을 실시간으로 계산할 수 있는 Instantaneous Phasor Method[7]를 사용한다.

### 2.3 온라인 지수의 개발

전력품질의 온라인 감시는 각 pcc(point of common coupling)에서의 전력품질을 정량화하여 기 설정된 기준과 비교하여 그 결과를 전력품질 제어센터로 전송함으로써 이뤄질 수 있다. 전력품질을 저하시키는 원인을 찾기 위해서는 어떤 pcc에서 전력품질 기준에 대한 위반이 발생하였을 때 해당 지역 전체 pcc에서 전력품질 지수 값을 동기화하여 보내줘야 한다. 이러한 온라인 적용을 위해서는 정해진 시간 안에 전력품질을 정량화한 지수의 계산이 이뤄져야 하고, 이러한 목적에는 THD가 적합하지 못하다. 본 논문에서 제안된 THED는 FFT를 통해 전 주파수 범위의 크기 값을 계산하는 대신 측정된 전류와 전압 파형에서 r.m.s.값과 기본파 성분만을 추출하기 때문에 빠른 계산이 가능하고 온라인 전력품질 감시를 위한 지수로 사용할 수 있다.

### 3. 사례연구

사례연구에서는 일반적으로 이용되는 THD, THD, TSHD 지수와 본 연구에서 제안하는 THED와의 비교연구를 수행한다. 본 사례연구에서는 고조파만을 포함하고 있는 전류원을 병렬로 연결하여 구성된 전류의 순시치 데이터를 이용하여 THD와 THED를 비교하고자 한다. 두 번째로는 비주기 성분을 포함하고 있는 데이터를 이용하여 3가지의 기존지수와 THED를 비교하는 연구를 수행한다.

#### 3.1 정수 배 고조파만을 포함하는 경우

본 연구에서는 다음의 회로를 구성하여 부하에 전달되는 전류의 순시값 데이터를 이용하였다.

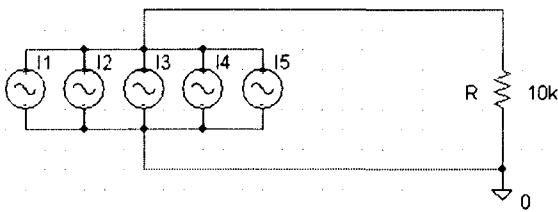


그림 1. 고조파 전류 데이터를 얻기 위한 회로

위 그림에서 각각의 전류원은 다른 주파수 성분을 갖는다. I1의 경우는 기본주파수 60Hz성분을 갖고 I2는 3차, I3는 5차 I4는 7차, 그리고 I5는 9차 고조파 성분을 갖는다. 그리고 샘플링 주파수는 10kHz로 하여 1초까지 10000개의 데이터를 구하였다. 다음 식은 각 고조파 성분이 합해진 전체 전류 신호의 구성을 나타낸다.

$$I(t) = \sqrt{2} \left( 4 \sin(2\pi 60t) + 2 \sin(2\pi 180t) + 0.8 \sin(2\pi 300t) + 0.4 \sin(2\pi 420t) + 0.1 \sin(2\pi 540t) \right) \quad (9)$$

다음 그림 2는 위 신호의 순시값을 나타내고 있다.

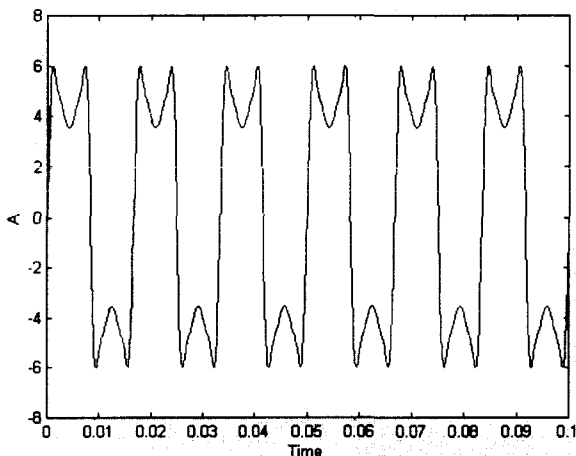


그림 2. 이용된 데이터의 순시값

위 식으로부터 THD, THED를 직접 계산할 수 있지만 본 연구에서는 FFT와 r.m.s.값을 직접 계산하여 각 지수의 값을 계산하고자 한다. 본 연구에서는 10kHz의 샘플링 주파수(fs)와 10000개의 데이터 셋(N)을 가지고 있으므로 FFT로 계산된 주파수영역에서의 값도 10000개의 데이터 셋을 갖게 된다. 따라서 FFT로 계산된 k번째 데이터의 의미는 fs k/N 주파수에서의 값을 의미하게 된다. 다음 그림 3에서 주파수 영역에서의 신호를 dB 값으로 보이고 있다. FFT 계산 후 데이터는 좌우 대칭의 데이터를 보이게 된다. 그림 3은 데이터 쌍의 왼쪽 부분만을 보이고 있는 것이며, 그림에서 나타내는 각 스파이크의 크기와 그것을 시간영역으로 환산한 값을 다음 표에 나타내었다.

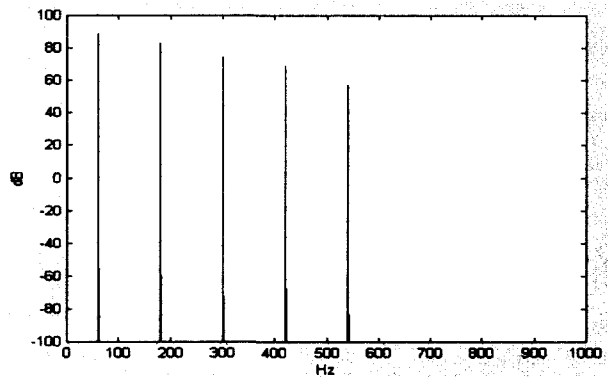


그림 3. 주파수 영역에서의 신호

표 1. 각 주파수 성분의 r.m.s. 값

Hz	$ X(k) $	$\frac{2 X(k) }{\sqrt{2N}}$
60	28284	4
180	14142	2
300	5656.9	0.8
420	2828.4	0.4
540	707.1	0.1

위 표에서 마지막 열에 보이고 있는 값은 식 (2)에서 제시하고 있는 신호의 각 주파수 성분에서의 r.m.s. 값과 일치함을 알 수 있다. THD와 THED를 계산하기 위하여 전류 성분만을 가지고 있는 데이터이기 때문에 전압의 값을 기본 성분만으로 이뤄지고 300 Vrms 값을 갖는다고 가정하였다. 고조파 왜곡 정도를 달리한 두 개의 전류 신호 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>를 이용하여 THED와 THD에 의한 고조파 왜곡 정량화를 비교하고자 한다. 계산된 THD와 THED의 값은 표 2에 나타내었다.

$$I_1(t) = \sqrt{2} \left( 4 \sin(2\pi 60t) + 2.2 \sin(2\pi 180t) + 0.88 \sin(2\pi 300t) + 0.44 \sin(2\pi 420t) + 0.11 \sin(2\pi 540t) \right)$$

$$I_2(t) = \sqrt{2} \left( 4 \sin(2\pi 60t) + 1.8 \sin(2\pi 180t) + 0.72 \sin(2\pi 300t) + 0.36 \sin(2\pi 420t) + 0.09 \sin(2\pi 540t) \right)$$

표 2. THED와 THD의 계산

	THD	THED	상대적 차이
$I(t)$	0.5483	0.1232	0.775
$I_1(t)$	0.6031	0.1437	0.762
$I_2(t)$	0.4935	0.1032	0.791

표 2에 나타난 대로 변화된 전류의 왜곡 정도를 THD와 THED 모두 잘 표현하고 있으며, THED의 경우 왜곡 정도가 커지는 경우에 대해 더 큰 지수 값을 나타낼 수 있다. 따라서, 고조파의 영향이 커질수록 본 논문에서 제시한 THED 지수는 가중된 값을 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 제시하는 THED 지수는 계산함에 있어서 전압과 전류의 r.m.s. 값을 알고 있어야 한다. 앞의 데이터를 이용하여 r.m.s. 값을 계산하면 4.5618가 되고 기본 주파수 성분의 r.m.s. 값 4를 고려해 볼 때 기본 주파수 성분이 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

3.2 비주기 신호의 경우

이 절에서는 비주기 신호에 대하여 THD, TIHD, TSHD, THED를 계산하여 비교하고자 한다. 그림 4는 전기 아크로 부하의 비주기 전류 순시값을 나타낸 것으로 전기 아크로 부하는 대표적인 highly varying 부하이다.[8] 전기 아크로 부하는 두 개의 동작 영역으로 구분되며, 그것은 용융 과정과 정제 과정이며 각각 다른 형태의 동작 특성을 가진다. 용융 과정에서 큰 전류가 사용되며 이로 인한 고조파와 플릭커 문제가 전기 아크로로 인한 주요 전력 품질 저하 현상이다. 본 논문에서는 전기 아크로 전극이 금속에 닿은 순간을 기준으로 3개의 상이한 동작 영역을 선정하여 본 논문에서 언급된 지수들을 계산하여 비교하고자 한다. 3개의 동작 영역은 Case 1: 14초-16초간, Case 2: 28초-30초간, 그리고, Case 3: 48초-50초간이다. 그림 4와 5는 Case 1에 대한 전류와 전압의 파형을 나타내고 있다.

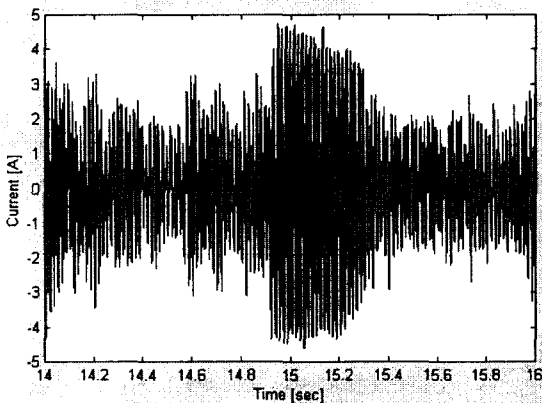


그림 4. Case 1 전류 파형

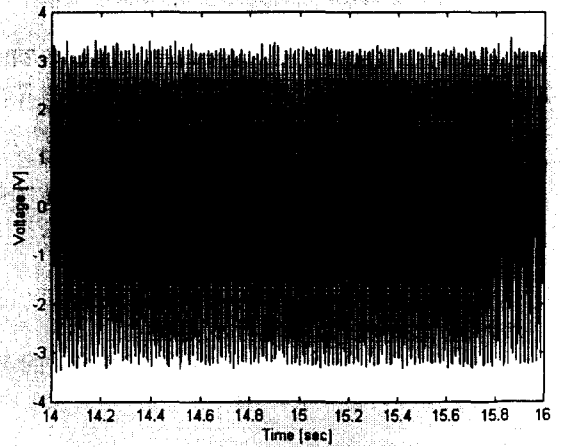


그림 5. Case 1 전압 파형

그림 6과 7은 case 1의 전류와 전압에 FFT를 적용하여 구한 스펙트럼을 나타내고 있다.

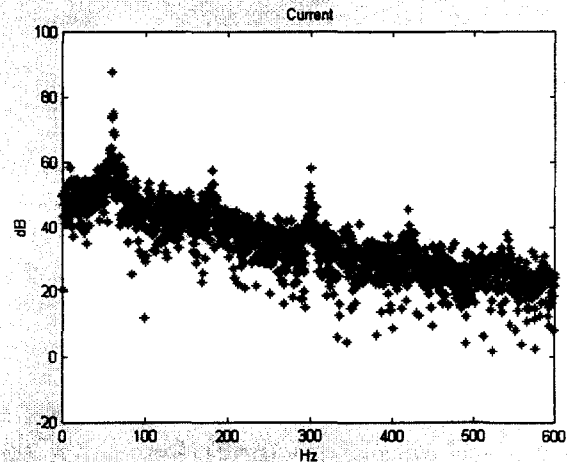


그림 6. Case 1 전류 스펙트럼

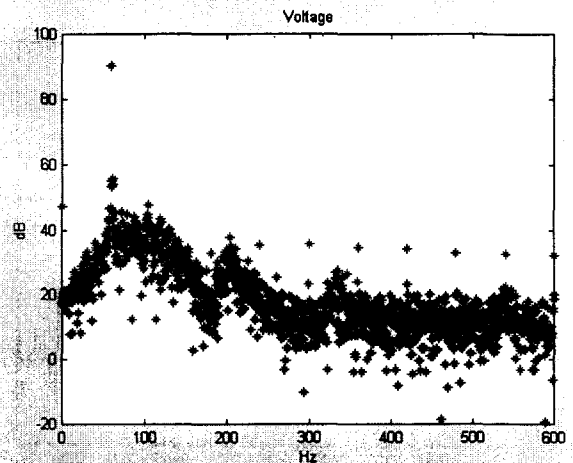


그림 7. Case 1 전압 스펙트럼

그림 8과 9는 case 2에 해당하는 전류와 전압 파형을 나타낸 것이며, 그림 10과 11은 case 3에 해당하는 전류와 전압의 파형을 나타낸 것이다.

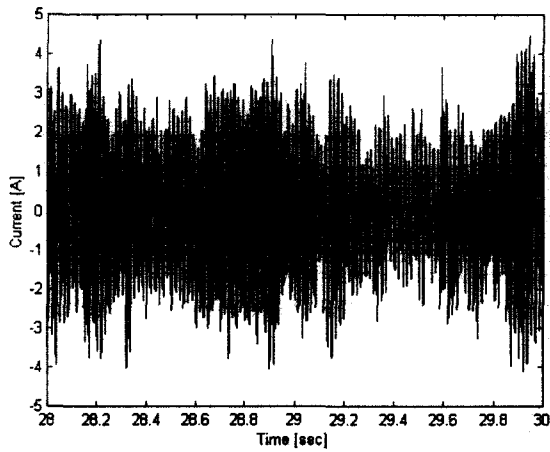


그림 8. Case 2 전류 파형

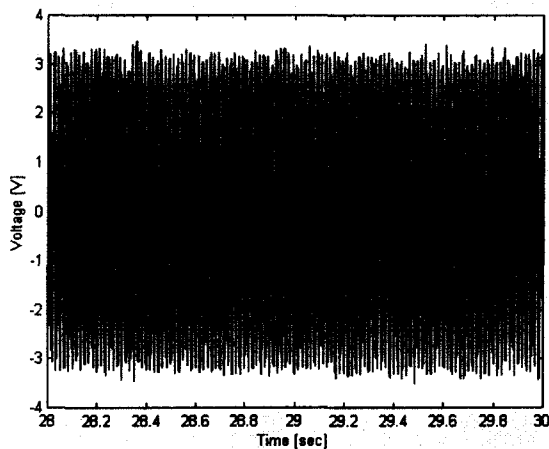


그림 9. Case 2 전압 파형

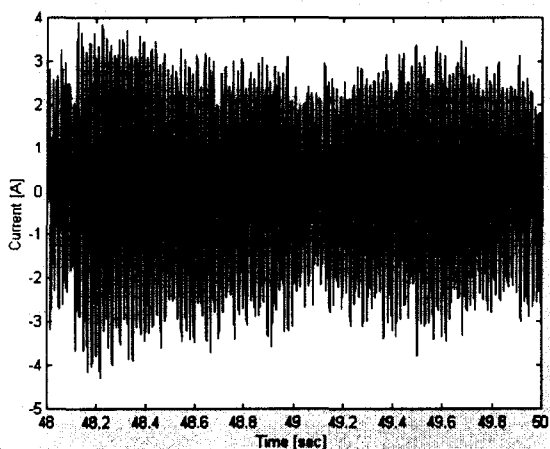


그림 10. Case 3 전류 파형

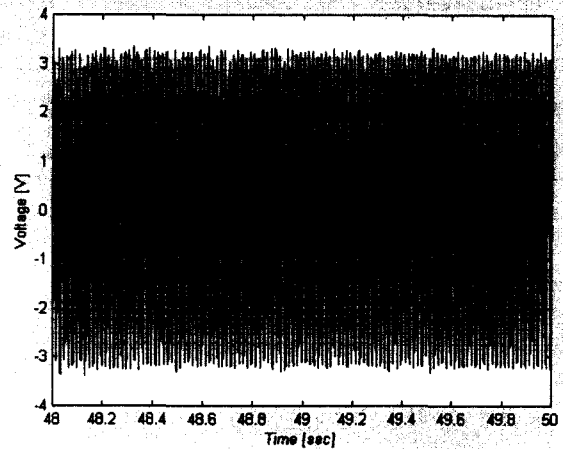


그림 11. Case 3 전압 파형

운전 초기인 case 1의 경우가 전류 및 전압 크기의 변화가 심함을 확인할 수 있으며, 주어진 주파수 영역에서의 데이터를 이용하여 전류와 전압 각각에 대하여 앞에서 설명된 고조파 정량화 지수들인 THD, TIHD, TSHD, THED 값을 계산하여 비교하고자 한다. THD 계산에서는 50차 고조파까지를 대상으로 하였으며, TIHD는 3000 Hz 이하의 interharmonics까지 계산에 포함시켰고, TSHD의 계산을 위해서는 60 Hz이하에 대해 1Hz씩 증가시켜가며 계산을 수행하였다. 표 3은 계산된 각 지수들의 값을 나타내고 있다.

표 3. 비주기 신호에 대한 고조파 정량화 지수값

Case	THD <sub>v</sub>	THD <sub>i</sub>	TIHD <sub>v</sub>	TIHD <sub>i</sub>	TSHD <sub>v</sub>	TSHD <sub>i</sub>	THED
1	0.0068	0.0442	0.0429	<b>0.4215</b>	0.0286	<b>0.3628</b>	<b>0.7820</b>
2	<b>0.0774</b>	0.0168	<b>0.0512</b>	0.3417	0.0309	0.2921	0.7730
3	0.0122	<b>0.0518</b>	0.0469	0.1603	<b>0.0350</b>	0.1574	0.7568

위의 지수에 대한 검토를 통해 비주기 신호의 경우 THD 값은 상당히 작은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 신호는 interharmonics 성분과 subharmonics 성분들이 많이 포함되어 있는 경우이므로 기존의 THD가 잘못된 정보를 주고 있음을 나타낸다. 이는 계산된 TIHD와 TSHD를 통해서 확인할 수 있다. 전기 아크로의 경우 부하 전류의 변동이 큰 만큼 전류에서의 고조파 왜곡이 심하며, 이는 전류에 대한 지수 값들이 전압에 대한 값 보다 10 여배 큰 것으로 확인할 수 있다. 또한 이 표를 통해 전기 아크로 운전 조건에서 가장 고조파 왜곡이 심한 상태는 TIHD<sub>i</sub>가 최대 값을 가지는 case 1이라는 것을 알 수 있으며, 제안된 THED 지수 역시 case 1에서 최대 값을 나타내어 비 주기 신호에 대한 고조파 왜곡의 정량화 지수로서의 유용성을 입증하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전력 품질의 저하를 초래하고 고조파 공진 현상을 일으키는 고조파 왜곡 현상을 정량화할 수 있는 새

로운 지수를 제안하였으며, 사례 연구를 통해 그 유용성을 입증하였다. 제안된 THED 지수는 실측을 통해 r.m.s. 값을 구하고 기본 주파수 성분만을 추출함으로써 계산이 가능하여 점점 그 필요성이 증대되는 온라인 전력 품질 감시에 활용이 가능하다. 또한 전압과 전류의 고조파 왜곡을 동시에 정량화함으로써 실질적인 고조파 왜곡에 대한 영향을 표현할 수 있다. 하지만, 기존의 고조파 정량화 지수 THD와 TIHD의 경우 기본 주파수 외의 다른 정수 고조파 및 율리수 고조파를 각각 구하고 있기 때문에 이들에 대한 영향 정도에 따라서 가중치를 줄 수 있지만 본 논문에서 제안하는 THED 지수는 기본 주파수 성분만을 구함으로 인하여 가중치를 줄 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 특정 고조파의 영향을 표현할 수 있는 지수로의 확장이 요구된다.

**감사의 글**

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음. (과제관리번호: 제 00-010호)

**참 고 문 헌**

[1] EPRI, Electricity Technology Roadmap, July 1999.  
 [2] Brooks, D L, Dugan, R C, Waclawiak, M and Sundaram, S, Indices for assessing utility distribution

system r.m.s. variation performance, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, January 1998.  
 [3] Jaramillo, S G, Heydt, G T, O'Neil-Carrillo, E, Power Quality Indices for Aperiodic Voltages and Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, April 2000.  
 [4] Sabin, D D, Brooks, D L, Sundaram A, Indices for Assessing Harmonic Distortion from Power Quality Measurements: Definitions and Benchmark Data, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999.  
 [5] Arrillaga, J, Watson, N R, Chen, S, *Power System Quality Assessment*, Wiley, 2000.  
 [6] IEEE 519: 1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (ANSI)  
 [7] Hsu, J S, Instantaneous Phasor Method for Obtaining Instantaneous Balanced Fundamental Components for Power Quality Control and Continuous Diagnostics, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998.  
 [8] Jang, G, Wang, W, Heydt, G T, Venkata, S S, Lee, B, Development of Enhanced Electric Arc Furnace Models for Transient Analysis, *Electric Machines and Power Systems*, November, 2001.

**저 자 소 개**



**장길수 (張吉洙)**

1967년 10월 26일 생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Iowa주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박). 2000년 3월-현재 고려대 공대 전기전자전파공학부

조교수

Tel : 02-3290-3246, Fax : 02-921-0544

E-mail : gjang@elec.korea.ac.kr



**이병준 (李炳峻)**

1961년 7월 16일 생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 미국 Iowa State Univ. 전기공학과 졸업(석사), 1994년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1995년 Iowa State Univ. Post Doc. 1995년~1996년 일본 미쯔비시 전기 근무. 현재 고려대학교 전기·전자·전파공학부 부교수.

Tel : 02-3290-3242, Fax : 02-921-1325/0544

E-mail : leeb@elec.korea.ac.kr



**송화창 (宋和昌)**

1973년 1월 24일 생. 1997년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기·전자·전파공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 02-3290-3697

E-mail : sunny@elec.korea.ac.kr