

상호고조파에 의한 플리커의 측정에 가능한 IEC 플리커미터의 설계

조수환, 정재안, 장길수, 권세혁
고려대학교 전기공학과

Modification of IEC Flickermeter to Measure the Flicker Caused by Inter-Harmonics

Soo-Hwan Cho, Jae-Ahn Jung, Gilsoo Jang and Sae-Hyuk Kwon
Electrical Engineering, Korea university

Abstract - Now the IEC flicker measuring algorithms and its flicker index of P_{st} and P_{It} are accepted internationally as standards. But it is recently found that IEC flickermeter has a main drawback that it cannot afford to detect the fluctuating patterns of voltage envelope caused by interharmonics higher than 102Hz in the 60Hz power system. This is brought about by two components of IEC flicker measuring steps, squaring and low-pass filtering. This paper presents the innate defect of IEC flickermeter and proposes a modified measuring method considering the voltage flickers by subharmonics and interharmonics.

1. 서 론

1986년 IEC Std.를 통해 새로운 플리커 측정 알고리즘이 소개된 이후 유럽과 미국을 필두로 관련 연구가 활발히 진행되었으며 결국 전 세계적으로 IEC 플리커미터가 국제적인 기준으로 받아들여지게 이르렀으며 그동안 전압의 변동에 따른 전등부하의 영향을 수치화하기 위해 개발된 플리커지수들은 고조파와는 다른 전압변동 양상으로 인식되었다. 하지만 1990년대 초 상호고조파에 의한 포락선의 변동이 플리커지수 계산 알고리즘에서 고려한 포락선의 변동 양상과 유사하다는 것이 알려지면서 IEC 플리커미터의 결점이 수학적으로 증명되었다 [1], [2]. 근래에 들어 우리나라에서도 IEC 플리커 알고리즘의 관련 연구가 진행됨에 따라, 본 논문을 통해서 IEC에서 권고하는 플리커 측정 알고리즘의 취약점을 알리고 그에 대한 해결방안으로 확장된 가중치필터를 새로이 제안하겠다.

2. 상호고조파와 플리커의 관계

2.1 상호고조파에 의한 플리커 현상

일반적으로 플리커는 전압 실효치의 변조현상으로 인식된다. 전기에너지가 전구라는 물리적인 기구를 통해서 빛에너지로 변환되는 과정에서 전기적요인(전압)이 전구의 밝기에 어떠한 영향을 주게 될 것인지가 바로 플리커 연구의 시초가 되었다. 이를 일반화하기에 용이하도록 백열전구가 선택되었다. 백열전구는 전류에 의해 필라멘트가 가열되고 그 열로 인해 발생하는 빛을 이용하는 대표적인 전등부하이다. 결국 플리커란 시간에 따른 소비전력의 변화 양상이 빛을 통해 사람에게 주는 영향을 수치화한 것이라 할 수 있다. 전구의 텅스텐 필라멘트의 저항은 일정하므로 소비전력은 전압의 제곱에 비례하게 된다. 결국 앞에서 말한 바와 같이 플리커는 전압 파형의 에너지적 관점에서 전압실효치의 변동에 대한 전등부하의 영향을 평가하기 위한 전기품질 지수라고 정의내릴 수 있다. IEC에서 권고하는 IEC 아날로그 플리커미터는 아래와 같은 포락선식에 기반을 두고 있다.

$$y = V_1 \sin(2\pi f_1 t) \times \{1 + V_2 \sin(2\pi f_2 t)\} \quad (1)$$

여기에서 V_1 은 $V_{rms} \sqrt{2}$, f_1 은 시스템주파수(Hz), V_2 는 $\frac{\Delta V}{2V}$, f_2 는 플리커 주파수(Hz, 초당 변동수의 반)를 의미한다. 결국 1%, 12변동/초의 전압변동이라고 함은 $V_2=0.005$, $f_2=6$ Hz인 경우를 의미한다.

하지만 상호고조파에 의해서도 유사한 포락선의 변동이 발생할 수 있으며 1개의 상호고조파(혹은 저조파)가 포함된 경우를 아래의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$y = V_1 \{ \sin(2\pi f_1 t) + m \sin(2\pi f_{IH} t + \theta_{IH}) \} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에 해당하는 전압신호의 파형과 반주기 실효치의 변화를

그림 (1)에 나타내었다. 파형 상으로는 비슷해 보이지만 각각의 푸리에 분석 결과를 살펴보면 상이하다.

상호고조파가 포함된 경우 플리커를 일으키는 변조주파수는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$f_2 = |f_{IH} - h f_1| \quad (3)$$

여기에서 f_{IH} 는 상호고조파의 주파수 성분이며 h 는 f_{IH} 에 가장 가까운 고조파 차수를 의미한다. 그림 (1)의 경우 $f_{IH}=54$ Hz를 사용하여 기본 주파수성분과의 차이(6Hz)만큼의 플리커가 발생됨을 확인할 수 있다.

하지만 포락선의 형태가 같더라도 함유된 고조파의 차수가 높아질수록 플리커에 영향을 주는 전압의 실효치는 점점 작아진다. 이것은 그림 (1)의 D와 F를 통해 확인할 수 있으며, 실효치 계산결과는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} V_1^2 [\sin(2\pi f_1 t) + m \sin(2\pi(f_1 + \Delta f)t + \theta_{IH})]^2 dt} \quad (4)$$

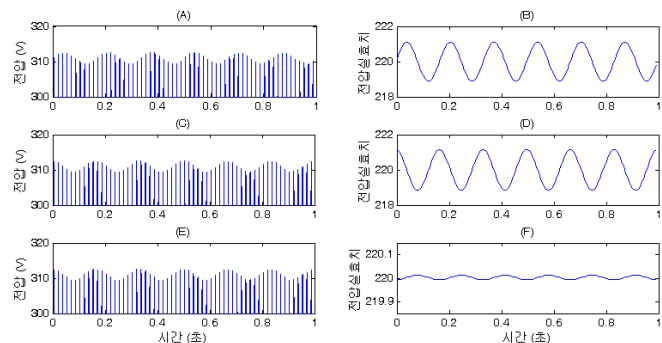
일반적으로 $m \ll 1$ 이므로 m^2 을 무시하여 식 (4)를 풀면

$$V_{rms} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{2m \sin(\pi \Delta f T_1) \cos(\pi \Delta f T_1 + \theta_{IH})}{\pi \Delta f T_1 \left(1 + \frac{\Delta f T_1}{2}\right)}} \quad (5)$$

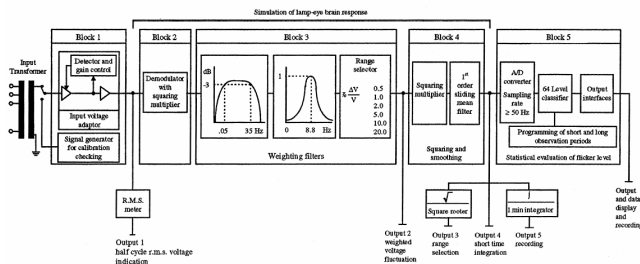
결국 전압실효치의 상대적인 변동을 플리커 주파수에 대한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \left| \frac{m}{\left(1 + \frac{\Delta f T_1}{2}\right)} \frac{\sin(\pi \Delta f T_1)}{\pi \Delta f T_1} \right| \quad (6)$$

전압포락선의 형태(특히 주파수)가 같다고 하더라도 실질적으로 플리커를 유발하는 전압실효치의 변동은 함유된 상호고조파의 크기에 크게 영향을 받는다. 식 (6)에 따르면 기본주파수 근처에서는 최대 104%, 2~3고조파 사이에서는 최대 12%, 3~4고조파 사이에서는 최대 5%, 4~5고조파 사이에서는 최대 3% 등으로 상호고조파의 크기가 커짐에 따라 전압 실효치 변동에 주는 영향이 감소됨을 알 수 있다.



<그림 1> IEC 정의(1%, 12변동/초)에 의한 전압신호(A)와 실효치분석 결과(B), 상호고조파(54Hz, 294Hz)가 함유된 경우의 전압신호(C, E)와 실효치분석 결과(D, F)



<그림 2 IEC 플리커미터의 블록다이어그램>

2.2 IEC 플리커미터의 취약점

그림 (2)를 통해 IEC 플리커미터의 구조를 간단히 살펴보면 입력단 (블록1)에서 순시전압을 실효치의 평균값으로 나눠 p.u 단위로 만든 후 블록2에서 제곱기(Demodulator)를 통해 백열등의 필라멘트에서의 특성, 즉 에너지의 소비량을 모의한다. 그 후 블록3의 대역통과필터(0.05, 42 Hz의 차단주파수)를 통과하게 되는데 이 과정에서 직류성분과 기본주파수의 2배 이상에 해당하는 성분이 제거된다. 이로 인해 IEC 플리커미터가 상호고조파에 의한 플리커에 둔감해지게 된다. 이후 가중치필터를 거치면서 각 주파수 성분에 다른 가중치를 부여하여 출력신호를 만든다. IEC에서 고려한 포락선(여기에서는 편의상 코사인함수를 사용함)을 제공한 후 그에 해당하는 주파수 성분을 살펴보면 다음과 같다.

$$v_1^2 = V_1^2 \cos^2(2\pi f_1 t) \times \{1 + 2V_2 \cos(2\pi f_2 t) + V_2^2 \cos^2(2\pi f_2 t)\} \quad (7)$$

일반적으로 V_2 는 1보다 많이 작으므로 V_2^2 은 무시할 수 있다. 결국

$$v_1^2 \approx \frac{V_1^2 V_2}{2} \cos(2\pi(2f_1 + f_2)t) + \frac{V_1^2}{2} \cos(2\pi(2f_1)t) + \frac{V_1^2 V_2}{2} \cos(2\pi(2f_1 - f_2)t) + V_1^2 V_2 \cos(2\pi f_2 t) + \frac{V_1^2}{2} \quad (8)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기에서 $f_1=60\text{Hz}$ 이고 $0 < f_2 < 42\text{Hz}$ 이므로 대역통과필터를 통과한 후에는 플리커를 유발하는 성분인 f_2 과 $2f_1 - f_2$ 이 남게 된다. 이 성분들이 가중치필터의 입력으로 사용된다.

하지만 상호고조파에 의한 포락선을 입력으로 한 경우에는 제곱기와 필터를 통과하면 대부분의 성분이 사라진다.

$$v_2^2 = \{V_1 \cos(2\pi f_1 t) + m V_1 \cos(2\pi f_{IH} t)\}^2 = V_1^2 \cos^2(2\pi f_1 t) + m V_1^2 \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_{IH} t) + m^2 V_1^2 \cos^2(2\pi f_{IH} t) \quad (9)$$

위와 마찬가지로

$$v_2^2 \approx \frac{V_1^2}{2} \cos(2\pi(2f_1)t) + m V_1^2 \cos(2\pi(f_{IH} + hf_1)t) + m V_1^2 \cos(2\pi(f_{IH} - hf_1)t) + \frac{V_1^2}{2} \quad (10)$$

로 표현된다. 식 (3)과 (10)을 통해서도 고조파차수 h 에 따라 필터링의 결과가 달라짐을 예측할 수 있다.

식 (3)에 따르면 8Hz의 플리커를 발생시킬 수 있는 주파수 성분은 52, 68, 112, 128, 172, 188Hz 등 정수배 고조파와 $\pm 8\text{Hz}$ 의 차이를 갖는 성분이며 정수배고조파 성분을 기준으로 쌍으로 존재하게 된다. 쌍으로 존재할 경우와 둘 중 한 성분만 포함된 경우 포락선의 형태는 같으므로 연구에서는 $f_{IH} = hf_1 - f_2$ 만 고려하도록 한다. $0 < f_{IH} < f_1$, 즉 저조파에 의한 플리커이면 $2f_{IH} < f_{IH} + f_1 (= 2f_1 - f_2) < 2f_1$ 이고 $0 < f_{IH} - f_1 (= f_2) < f_1$ 이므로 이 두 성분이 남게 되며, 이 결과는 IEC 포락선에 의한 결과와 동일하다. 결국 IEC 포락선은 저조파에 의한 포락선으로 해석될 수 있다. $f_1 < f_{IH} < 3f_1$ 인 경우에는 $f_{IH} - 2f_1 (= f_2)$ 성분만 남으며 $3f_1 < f_{IH}$ 인 경우에는 모든 성분이 제거된다.

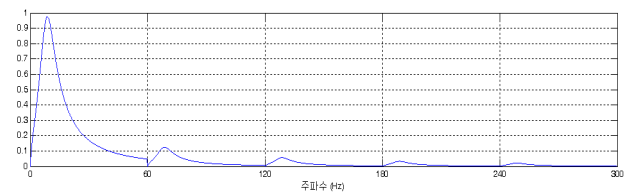
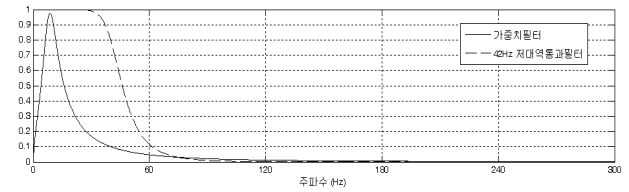
결국 IEC 플리커미터에서 구현된 알고리즘은 3차고조파 이상의 상호고조파에 의한 플리커 현상을 감지할 수 없다.

3. 확장된 가중치필터의 설계

시각적으로 인식가능한 최대 주파수 변동은 약 42Hz으로 주파수에 따라 인식정도가 상이하다. 이는 가중치필터에 반영되어 있다.

결과적으로 블록3을 통해 대역을 한정시킨 후 가중치필터를 통과시키는 과정을 확장된 개념의 가중치필터를 통해 유사하게 구현할 수 있다. 가중치필터를 60Hz 간격으로 연속적으로 배열한 후 식 (6)에서 계산된 정수배 고조파 별 실효치 감소량을 고려하여 아래의 그림 (3-하)과 같이 설계하였다.

6차이상의 상호고조파에 의한 플리커는 무시할 정도 작기 때문에 5차 이하(300Hz)의 상호고조파만을 고려하였다. 하지만 그림과 같은 연속적인 가중치필터의 구현이 어려움으로 다양한 상호고조파에 대해 각기 다른 가중치 필터를 사용하여 모의하였다.



<그림 3> (상)IEC플리커미터의 필터들의 보드선도, (하)확장된 가중치 필터의 보드선도

<표 1> 다양한 상호고조파에 의한 플리커 입력의 IFL 계산 결과

	함유된 상호고조파 성분 (크기:0.256%)	IEC 플리커미터	확장된 가중치필터
신호 1	52Hz (68Hz)	1.006910	1.006907
신호 2	112Hz (128Hz)	0.000379	0.016355
신호 3	172Hz (188Hz)	0.000081	0.003450
신호 4	232Hz (248Hz)	0.000081	0.001214
신호 5	292Hz (308Hz)	0.000081	0.000571
신호 6	352Hz (368Hz)	0.000081	0.000081

각기 다른 상호고조파에 의해 발생된 포락선 곡선을 입력으로 하여 IEC 플리커 알고리즘을 이용한 경우와 확장된 가중치필터를 이용하여 계산된 IFL값을 표 1에 나타내었다.

표 1에 따르면 기존의 IEC 플리커 측정 알고리즘은 3차 이상의 상호고조파에 의한 플리커를 감지 못하고 있다. 하지만 확장된 가중치필터를 사용할 경우 약 5차의 상호고조파에 의한 플리커를 감지한다. 하지만 플리커를 발생시키는 상호고조파의 차수가 높아짐에 따라 지수에 반영되는 정도는 매우 작다. 이 점이 현재 IEC 플리커미터의 측정 알고리즘이 계속 적용되고 있는 이유이다. 즉 상호고조파에 의한 포락선의 변동이 야기하는 오차가 매우 작다는 것이다.

4. 결 론

본 논문을 통해 IEC 플리커미터가 상호고조파에 의한 플리커를 감지 못하는 단점이 있음을 수학적으로 증명하였으며 또한 그 점을 보완하기 위해 확장된 개념의 가중치필터를 설계하였다. 하지만 여러 주파수 대역에 걸쳐 정수배 고조파들을 중심으로 쌍으로 존재하는 실질적인 전압신호에 대한 결과값에 있어서 큰 차이가 없을 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

[1] W. Mombauer, "Flicker Caused by Interharmonics", etzArchiv, Bd.12 H.12, pp. 391-396, 1990.
 [2] W. Xu, "Deficiency of the IEC Flicker Meter for Measuring Interharmonic-Caused Voltage Flickers", 2005 IEEE PES General Meeting, Vol. 3, pp. 2326-2329, June 2005.