반주기 슬라이딩 윈도우와 재귀적 실효치 계산을 이용한 국내 플리커 평가지수 산출기법

논 문
60-11-4

Equivalent 10-Hz Flicker Index Calculation Using Half-cycle Sliding Window and Recursive RMS Method

조 수 환*
(Soo-Hwan Cho)

Abstract - Flicker, which is also known as voltage fluctuation, is an electromagnetic phenomenon generated by large scale nonlinear loads, such as arc furnaces and welding machines. Since a severe and continuous flicker can cause to some damages to electrically sensitive loads as well as human's visual irritations, it needs to be appropriately managed by being accurately measured, quantified and assessed. In Korea, an equivalent 10-Hz flicker index, shortly ΔV10, is used to determine the permission limit of flicker. This paper presents an efficient calculation of the flicker index by using a half-cycle sliding window and a recursive method, showing a concrete calculating procedure of ΔV10 from the viewpoint of signal processing.

Key Words : Half-cycle sliding window, Flicker, Recursive RMS method, Voltage fluctuation, ΔV_{10}

1. 서 론

전력계통 내에서 발전원들이 다양해지고 수용가들의 설비들이 대용량화, 고성능화해짐에 따라 전력품질(Power Quality, PQ) 왜란 발생요인은 물론 왜란에 의한 피해요인이 점점 늘어나고 있다. 분산전원, 스마트그리드 등 전력계통 패러다임의 변화와 함께 전력품질의 왜곡이 더욱 가속화될 가능성이 높기 때문에 그에 대한 철저한 대비가 시급한 실정이다. 이러한 환경에서 전력품질은 단순한 전압신호의 왜곡현상에 그치는 것이 아니라 계통 전체의 신뢰성과도 밀접하게 관련된다 [1]. 전력품질을 일정 수준 이상으로 유지하기 위해서는 무엇보다도 PQ 측정 및 정량화, 평가기법이 정확하고 효율적으로 수립되어야 한다. 우리나라의 스마트그리드 관련 5대 실행로드맵에 따르면 전력품질(PQ)과 관련된 연구항목은 크게 전력품질 측정, 평가기법과 전력전자기기를 활용한 보상기법 이렇게 두 분야로 구분된다. 스마트그리드의 전력품질 모니터링 시스템을 구성하는 핵심장비인 IED(Intelligent Electronic Device)와 AMI(Advanced Metering Infrastructure)에도 전압, 전류, 유/무효전력량, 역률 등 기존의 전기량 이외에 전압/전류고조파 및 THD (Total Harmonic Distortion) 지수, 플리커, 파형 캡쳐 등 다양한 기능들이 추가되어야 한다 [2]. 전압, 전류신호를 취득하여 이러한 다양한 전기량들을 계산하는 방법 역시 첨단설비들의 성능 및 경제성을 결정하는 중요한 요인이 된다.

전력품질 평가에는 크게 순시치 기반의 데이터와 실효치 기반의 데이터가 사용된다. 순시치 기반의 데이터는 취득된 실시간 데이터를 그대로 사용하며 주로 파형에 대한 왜곡을 관찰하기 위한 목적으로 사용된다. 여기에는 주로 과도현상, 고조파, 플리커 등과 같이 파형(waveform)의 외형과 특성을 파악함으로써 왜란의 발생유무를 판단한다. 또한 이러한 파형왜곡(waveform distortion)은 실제 전압 혹은 전류 파형에 대한 계속적으로 모니터링을 필요로 한다. 이에 반해 실효치 기반의 데이터는 순시치 데이터를 실효치로 가공하여 실효치 변동을 파악함으로써 발생유무를 판단한다. 여기에는 순간전압강하, 순간전압상승, 순간정전, 과전압(Over-voltage), 저전압(Under-voltage) 그리고 정전 등이 포함된다. 이 경우 각 현상의 정의에 따라 크기와 지속시간으로 구분되며 발생유무가 트리거링(triggering)을 통해 인지되기 때문에 트리거링 조건에 대한 정확한 정의가 선결되어야 한다.

본 논문에서는 반주기 슬라이딩 윈도우를 이용한 재귀적 실효치(RMS) 계산을 통해 얻어진 데이터를 활용하여 플리커의 파형왜곡 특성을 파악하는 기법을 소개하고 국내에서 사용되고 있는 플리커 평가지수인 10Hz 등가플리커 지수(ΔV10)를 계산하기 위한 효율적인 방법을 제안하고자 한다.

2. 플리커의 신호적 특성

플리커(flicker)는 전압변동(voltage fluctuation)이라는 용어와 구별할 필요가 있다. IEEE 표준에 따르면 플리커와 전압변동은 각각 다음과 같이 정의된다 [3].

- 플리커(flicker): 시간에 따라 휘도 혹은 주파수 스펙트럼이 변하는 불빛의 자극에 의해 감지되는 시감각의 불안정한 느낌
- 전압변동(voltage fluctuation): 일련의 전압크기의 변화 혹은 전압 포락선 신호의 주기적인 변동

* 정 회 원 : 상명대 융복합특성화대학 에너지그리드학과 교수
E-mail : shcho@smu.ac.kr
접수일자 : 2011년 8월 3일
최종완료 : 2011년 10월 19일

플리커는 사람의 시감각이 느끼는 매우 주관적인 시각인지를 의미하고 전압변동은 신호적인 특성에 의해 파악되는 매우 객관적인 신호변동현상을 의미한다. 다시 말해서 외부 부하의 비선형적인 전력소비에 의해서 발생한 전압변동이 전등부하에 영향을 주어 나타나는 시각적인 깜박임이 바로 플리커이다. 즉, 플리커는 전압변동의 예기치 않은 결과이며, 전압변동은 플리커를 발생시키는 원인으로 파악할 수 있다 [4].

그러므로 플리커의 평가를 위해서는 측정단계에서 먼저 순수한 신호측면에서의 전압변동의 특성을 파악한 후 정량화 단계에서 시감각과 두뇌 기억감각에 대한 고려가 이뤄져야 한다 [5].

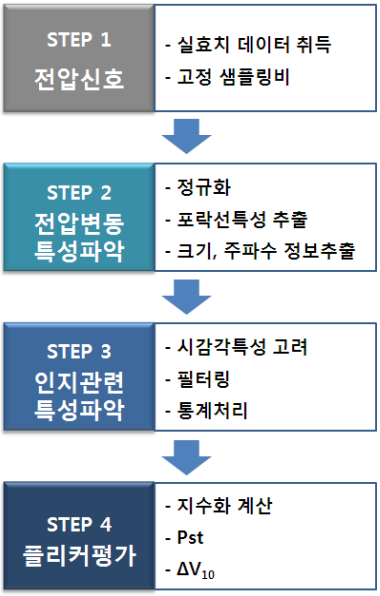

그림 1 플리커의 평가단계

Fig. 1 General Procedure of Flicker Evaluation

그림 1에서 보는 바와 같이 플리커 평가를 위해서 전압파형에 대한 특성을 파악하는 것이 중요하다.

일반적으로 전압변동 파형에 대한 수학적 표현은 다음과 같다.

$$v(t) = \sqrt{2}\, V_{\mathrm{rms}} \times \cos(2\pi f_{sys} t) \times \left\{1 + \frac{\Delta V_f}{100} \times \frac{1}{2} \times \cos(2\pi f_f t)\right\} \quad (1)$$

여기에서 V_{rms}, f_{sys}, ΔV_f, f_f는 각각 계통의 정격전압 (실효치), 계통주파 수(60Hz), 전압변동의 크기(%) 그리고 주파수(Hz)를 의미한다.

괄호 안에 있는 부분이 포락선 성분을 의미하는데 전압변동의 변동크기에 1/2을 곱해줌에 주목할 필요가 있다. 그림 2가 이를 설명해준다. 그림 2는 20%, 10Hz의 전압변동을 포함한 전압신호의 파형을 보여주고 있다. 20%의 전압변동 성분은 그림과 같이 +10% 과 -10%의 변동을 의미하므로 이를 수식적으로 표현하기 위해 20%를 2로 나눠주는 것이다. 그리고 한 방향으로의 부호변화('-'에서 '+'로 혹은 '+'에서 '-'로의 변화)가 2번 반복되어야 한 주기가 되므로 10Hz는 초당 20회의 변동회수를 의미한다.

식 (1)을 정규화하면 아래와 같이 표현가능하다.

$$v(t) = \cos(2\pi f_{sys} t) \times \{1 + M\cos(2\pi f_f t)\}$$
$$= \cos(2\pi f_{sys} t) + \frac{M}{2}\{\cos(2\pi(f_{sys} + f_f)t) + \cos(2\pi(f_{sys} - f_f)t)\} \quad (2)$$

여기에서 $M = \Delta V_{10hz} / 200$을 의미한다.

식 (2)로부터 전압변동 신호는 기본주파수 성분과 두 개의 상호고조파 성분으로 이뤄져 있음을 알 수 있다.

3. 반주기 실효치 연산을 이용한 10Hz 등가 플리커지수 계산

3.1 반주기 슬라이딩 윈도우 기반의 재귀적 실효치 계산을 이용한 포락선 특성 추출

그림 2로부터 포락선(envelope)의 특성은 변동의 크기와 주파수임을 알 수 있다. 일반적으로 포락선 성분을 알기 위해서 제곱기를 사용한다. 식 (2)에 대해 제곱을 수행하면 다음과 같다.

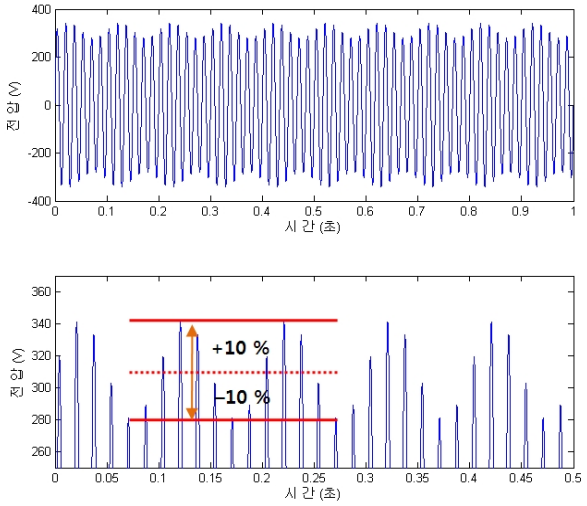

그림 2 전압변동 신호의 파형(위)과 확대된 모습(아래)

Fig. 2 Waveform of Voltage Fluctuation (top) and its enlarged version (bottom)

$$v^2(t) = \cos^2(2\pi f_{sys} t) \times \{1 + M\cos(2\pi f_f t)\}^2$$
$$= \cos^2(2\pi f_{sys} t) \times \{1 + 2M\cos(2\pi f_f t) + M^2\cos^2(2\pi f_f t)\} \quad (3)$$

여기에서 M은 $\Delta V_{10hz} / 200 < 1$이므로 $M2 << 1$로 무시할 수 있고 식 (3)은 다음과 같이 간략화된다.

$$v^2(t) \approx \cos^2(2\pi f_{sys} t) \times \{1 + 2M\cos(2\pi f_f t)\} \quad (4)$$

식 (4)에서 삼각함수의 제곱공식과 2배각, 곱의 공식을 이용해서 표현하면

$$v^2(t) \approx \frac{1}{2} + M\cos(2\pi f_f t) + \frac{1}{2}\cos(2\pi(2f_f)t)$$
$$+ \frac{M}{2}\cos(2\pi(2f_{sys} - f_f)t) + \frac{M}{2}\cos(2\pi(2f_{sys} + f_f)t) \quad (5)$$

과 같다.

식 (5)로부터 정규화된 순시치 전압신호에 대해 제곱을 수행하면 DC성분, 플리커 주파수의 성분, 플리커 주파수의 2배 성분, 계통주파수의 2배(120Hz) ± 플리커주파수 성분으로 구성됨을 확인할 수 있고 플리커 주파수의 성분과 그 크기를 알기위해서는 퓨리에변환을 사용한다.

결국 본 논문에서 제안하는 실효치 계산을 플리커 해석에 사용하기 위해서는 실효치 계산을 통해 이와 동일한 결과를 얻을 수 있어야 한다.

실효치(RMS)값은 다음과 같은 수학적 연산을 통해 계산된다.

$$V_{RMS}(t)=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} \tag{6}$$

여기에서 T는 신호의 주기(sec)를 의미한다.

식 (6)의 이산표현은 다음과 같다.

$$V_{RMS}[k]=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=k-(N-1)}^{N} v^2[k]} \tag{7}$$

여기에서 N은 샘플링비와 윈도우사이즈에 의해 결정되는 샘플의 개수를 의미한다. 일반적으로 실효치 계산에는 반주기 혹은 한주기 데이터가 사용된다. 본 연구에서는 256 샘플/초의 기본 샘플링비와 반주기 슬라이딩 윈도우를 사용(N = 128)하였으며 빠른 반주기 실효치 계산을 위해서 아래와 같이 회귀적 계산법을 사용하였다.

$$V_{RMS}[k+1]=\sqrt{V_{RMS}^2[k]+\frac{1}{N}\left(v^2[k+1]-v^2[k-N+1]\right)} \tag{8}$$

그림 2의 전압신호에 대해 반주기 실효치 연산결과는 아래 그림 3과 같다.

그림 3으로부터 실효치 계산을 통해 DC-offset 성분(220Vrms)과 전압변동의 크기 성분(10%)이 정확히 추출됨을 확인할 수 있다. 앞서 말한 바와 같이 전압변동 성분의 크기의 정의에 따라 계산된 크기에 2배(20%)를 해주어야 정확한 전압변동의 크기 구할 수 있다. 이는 다음 장에 소개될 ΔV_{10}의 정의식에서도 언급되는 중요한 내용이다.

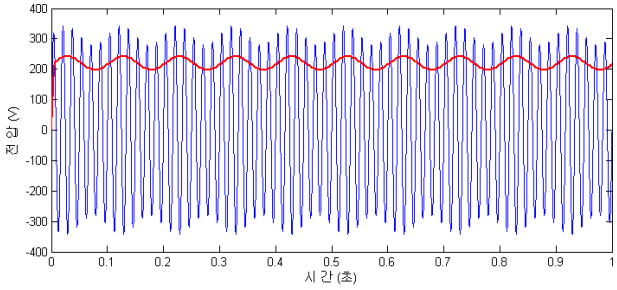

그림 3 재귀적 반주기 실효치 계산에 의한 포락선 추출

Fig. 3 Extraction of the Envelope Characteristics by the Recursive Half-cycle RMS Calculation

3.2 10Hz 등가플리커 지수의 계산 방법

국내에서는 플리커 평가를 위해 10Hz 등가 플리커지수(ΔV_{10})가 사용되고 있으며 그 관리 기준은 1시간 평균치로 0.45%이하이다. ΔV_{10}의 계산에는 그림 4와 같은 시감도계수가 사용된다.

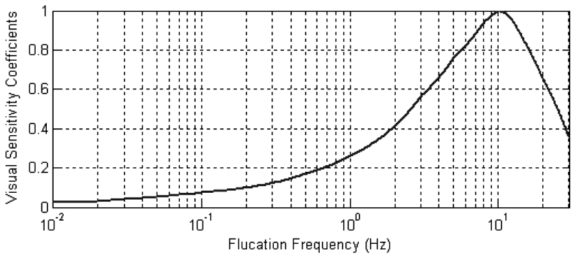

그림 4 ΔV_{10} 계산에 사용되는 시감도계수

Fig. 4 Visual Sensitivity Coefficient for ΔV_{10}

시감도계수는 플리커의 주파수 성분에 대한 시감각적 민감도를 의미하며 30Hz이하의 변동성분만 고려하고 10Hz에서 가장 민감함을 알 수 있다. 10Hz 성분에 가장 큰 1의 가중치를 부여하여 10Hz 성분에 등가화한 결과를 나타내므로 10Hz 등가 플리커지수로 명명되었다.

ΔV_{10}의 계산식은 아래와 같다.

$$\Delta V_{10}=\frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\left(a_m V_m\right)^2}}{V_{RMS}} \tag{9}$$

여기에서 V_m은 전압변동 성분의 크기의 2배를 의미하며 30Hz성분까지만 고려한다. M은 샘플링비와 푸리에 연산주기에 의해 결정되는 주파수빈(데이터 저장공간)의 개수이며 a_m은 주파수 f_m에 해당하는 시감도계수이다.

그림 4의 시감도계수가 전달함수 형식으로 주어진 경우 필터링을 통해 결과를 얻을 수 있지만 그렇지 않기 때문에 각 주파수빈의 주파수에 해당하는 시감도계수를 추정하여 식 (9)를 통해 계산해야 한다.

결과적으로 본 연구에서 제안하는 ΔV_{10} 계산방법은 아래의 그림 5와 같이 정리할 수 있다.

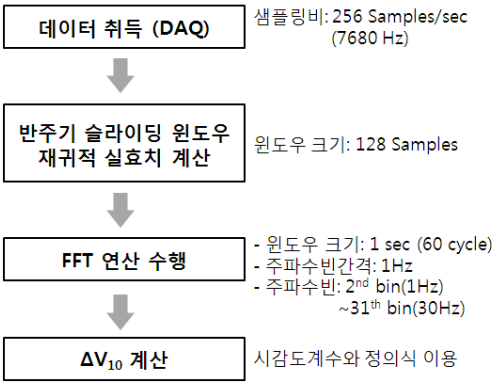

그림 5 제안하는 ΔV_{10} 계산과정

Fig. 5 Proposed Calculation Procedure of ΔV_{10}

4. 결 론

본 논문에서는 반주기 슬라이딩 위도우 기반의 재귀적 실효치 계산 결과를 10Hz 등가 플리커지수 계산에 활용하는 방법에 대해 살펴보았다. 이 방법을 이용하여 순시치, 실효치로 이분화되어 있던 일반적인 PQ 평가지수의 계산방법을 실효치 기반으로 단일화할 수 있을 것이다. 하지만 THD를 이용한 고조파의 왜곡평가에 적용하기 위해서는 실효치 계산결과에 고조파성분에 의한 왜곡(THD, Total Harmonic Distortion)은 물론 상호고조파에 의한 왜곡(TIHD, Total Inter-Harmonic Distortion)까지 동시에 포함된다는 사실을 확실히 인지해야 한다. 이것은 실제 전압, 전류신호가 이상적인 주기신호가 아니기 때문이다. 또한 향후에 실효치계산 결과를 활용한 IEC 플리커 측정 기법에 대한 연구도 진행할 예정이다. 현 IEC 플리커미터는 아날로그 스펙기반이기 때문에 디지털 구현 시 해당 기법을 블록 2에 사용한다면 좋은 성능을 보일 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] M. Olofsson, "Power Quality and EMC in Smart Grid", 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. 9.

[2] F. Zavoda, "Advanced Distribution Automation (ADA) Applications and Power Quality in Smart Grids", China International Conference on Electricity Distribution, 2010. 9.

[3] IEEE Standard 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", 1995. 6.

[4] R. C. Dugan, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, pp. 28-30, 2002.

[5] IEC Standard 61000-4-15, "EMC-Part 4: Testing and Measurement Techniques-Section 15: Flickermeter-Functional and Design Specifications", 2003. 2.

저 자 소 개

조 수 환 (趙 秀 桓)

1976년 10월 28일생. 2002년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2002~2004년 삼성전자 근무. 2009년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2009~2011년 한국원자력연구원 근무. 2011년~현재 상명대학교 에너지그리드학과 전임강사.

Tel : 02-781-7503

E-mail : shcho@smu.ac.kr