

# 전기자동차 충전기용 보급형 전력량계에 적용 가능한 고조파 왜곡 추정 알고리즘

## Harmonic distortion estimation applicable to a low-end electricity meter for an electric vehicle charger

김 옥 현\*, 김 경 은\*, 박 상 욱\*, 김 영 래\*, 전 주 영\*

Ukhyun Kim\*, Kyungeun Kim\*, Sangwook Park\*, Young Lae Kim\* and Jooyoung Jeon\*

### Abstract

In this paper, a Goertzel-based algorithm was proposed to calculate the amount of power by estimating the harmonic components generated during charging of the electric vehicle up to a very high order, allowing it to be applied to a low-cos electricity meter with low computing power. Using the proposed algorithm, it is verified through simulation for a simple example signal that even large-order harmonics can be sufficiently considered when wattage is measured.

### 요 약

본 논문에서는 전기자동차 충전시 발생하는 고조파 성분을 매우 높은 차수까지 추정하여 전력량을 계산하되 낮은 연산능력을 가지는 저가의 보급형 전력량계에서도 구동 가능하도록 Goertzel 기반 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 사용하여 전력량 계량시 큰 차수의 고조파까지 충분히 고려할 수 있음을 간단한 예제 신호에 대해 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

*Key words* : Harmonic Distortion estimation, Electricity meter, Electric vehicle, Electric charger, Goertzel algorithm

### 1. 서론

최근 전기자동차 관련 기술은 발전을 거듭하여 머지않은 미래 사회에는 전기자동차가 주력 운송수단이 될 것으로 기대되고 있다. 하지만 이러한 전기자동차 산업은 다른 산업과는 달리 충전 인프라가 먼저 확보되어야 하며 충전 인프라 기술 국제표준화 작업이 이미 충분히 진

행되어 일차적인 마무리를 앞두고 있다[1]. 또한 전기자동차는 카셰어링, 커넥티드 택시/버스 분야에서의 사용이 급증하고 있고[2] 공동주택에서의 충전 비용 부담 문제도 끊이지 않고 있어 정부에서는 전기자동차 충전기의 전력량계에 대한 세부적인 기술기준을 제시하고 있다. 이는 전기자동차 충전기를 전력이라는 상품을 거래하는, 오차 관리가 필요한 기기로 규정하는 것이며 이를 통해

\* Department of Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.

★ Corresponding author

E-mail : jyjeon@gwnu.ac.kr, TEL : +82-33-640-2430

※ Acknowledgment

This work was supported by Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) grant funded by the Korea government (MTIE) (No.20016533)

Manuscript received Dec. 17, 2022; revised Dec. 20, 2022; accepted Dec. 22, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정밀한 전력측정의 중요성이 강조되고 있음을 알 수 있다. 특히 충전시 발생하는 고조파 성분은 전력 측정의 오차를 유발하는 주요 원인이므로 그 양을 정확하게 추출하는 과정은 필수라고 할 수 있다[3].

하지만 이러한 높은 측정 정밀도를 위해서는 고가의 고성능 부품이 필요하고 이는 전력량계 및 충전기의 단가 상승으로 이어져 결과적으로 전기자동차 충전기의 보급 및 확산에 걸림돌이 될 것이다.

이에 본 연구에서는 성능이 낮은 저가의 보급형 전력량계에서도 고조파 성분을 일정 수준 이상으로 추출할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다.

## II. 본론

왜곡된 정현파는 기본주파수 성분과 그것의 정수배에 해당하는 주파수 성분들인 고조파(Harmonics)의 합으로 표현할 수 있는데 주파수가 기본주파수의  $n$ 배인 고조파를  $n$ 차 고조파라고 하며 그림 1은 고조파의 개념을 보여준다[4].

전기자동차 급속 충전기는 AC/DC 컨버터와 DC/DC 컨버터와 같은 전력변환장치를 사용하게 되는데 이러한 컨버터는 비선형 부하로서 전력계통에 고조파를 발생시키는 주요 원인이 된다[5].

이러한 고조파는 전력품질 및 전력기기에 악영향을 미치며 특히 전압파형의 왜곡을 초래하여 계량오차를 유발하는 문제를 발생시킨다. 따라서 정확한 계량을 위해서는 이 고조파 성분의 양을 추정할 수 있어야 하는데 높은 수준의 정확도를 확보하기 위해서는 20차 이상의 충분히 큰 차수의 고조파 성분까지 고려해야만 한다.

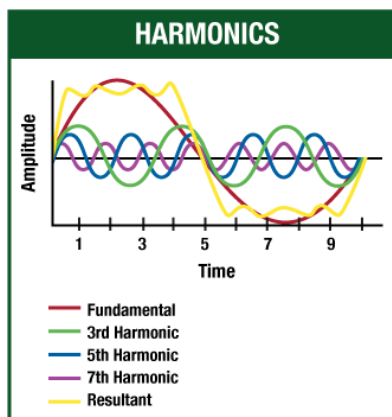


Fig. 1. Example of a distorted waveform containing harmonics [4].

그림 1. 고조파를 포함하는 왜곡된 파형의 예[4]

각 차수별 고조파 성분을 파악하고 고조파로 인해 야기된 신호의 왜곡을 추정하기 위해 신호처리 과정을 거치게 되는데 이 때 필요한 적정 샘플링 빈도는 Nyquist 이론에 의해 그 신호에 포함된 가장 높은 주파수의 2배 이상이어야 한다. 하지만 매우 큰 차수까지 고려해야 하는 상황에서 이러한 요구조건은 신호처리를 담당하는 MCU(microcontroller unit)가 높은 성능을 가져야 함을 의미하며 결과적으로 전기자동차 충전기의 단가 상승으로 이어지게 된다. 이는 전기자동차 충전 인프라의 확산을 저해하는 심각한 요소가 될 수 있기 때문에 이러한 문제를 개선하기 위해서는 저가의 MCU를 탑재할 수 있어야 하고 그에 따라 저하된 연산 능력으로도 실행 가능한 고조파 왜곡 추정 알고리즘이 필요하게 된다.

### 1. Harmonic Distortion

Harmonic distortion(HD)은 고조파에 의한 신호 왜곡을 측정하는 지표로서 fundamental frequency에 해당하는  $f_0$  성분의 power 대비 고조파 성분의 power로 정의된다(식 1).

$$HD = P_k / P_0 \quad (1)$$

이때,  $P_0$ 와  $P_k$ 는  $f_0$ 와  $k$ -차 고조파 성분( $kf_0$ )의 power를 의미한다.

### 2. Fast Fourier Transform 기반 HD 추정 알고리즘

Fast Fourier Transform(FFT)는 신호에 포함된 주파수 성분을 빠르게 분석할 수 있는 알고리즘이다. 이때, Parseval 이론에 근거하여, 각각의 주파수 성분의 power를 이용하여 HD를 계산할 수 있다(식 2).

$$HD = |X(k)|^2 / |X(k_0)|^2 \quad (2)$$

이때,  $X(k)$ 와  $X(k_0)$ 는 각각  $k$ -차 고조파 성분과  $f_0$ 에 대한 FFT 결과를 나타낸다.

### 3. Goertzel 기반 HD 추정 알고리즘

Goertzel 알고리즘은 관측 가능한 모든 주파수 영역에서 분석을 수행하는 FFT 알고리즘과는 달리, 특정한 주파수에서 성분 분석을 수행하는 알고리즘이다.  $k$ -차 고조파는 항상  $f_0$ 의 배수로 관찰되기 때문에, Goertzel 알고리즘[6]을 적용할 수 있다. 이때, FFT 알고리즘의 결과는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$|X(k)|^2 = s^2[N-1] + s^2[N-2] - 2\cos(2\pi \frac{kf_0}{f_s})s[N-1]s[N-2]$$

$$s[N] = x[N] + 2\cos(2\pi \frac{kf_k}{f_s})s[N-1] - s[N-2] \quad (3)$$

이때,  $x[n]$ 은 관측값을 나타내고,  $N$ 은 신호처리 단위 (frame 길이)를 의미한다. 매 관측점마다 주파수를 특정하여 분석함으로써, 저사양 하드웨어에서 효과적인 동작을 기대할 수 있다. 표 1은 Goertzel 알고리즘에 기반하여 특정 주파수 성분의 power를 계산하는 의사코드 (pseudo-code)를 보여준다.

Table 1. Pseudo-code of power calculation based on Goertzel algorithm.

표 1. Goertzel 알고리즘 기반 power 계산기 의사코드

Input	$x[n], 0 \leq n \leq N-1$
Variable declaration	$N, p$ (frequency index)
Start	$\omega = 2\pi p/N$
	$cr = \cos(\omega)$
	$co = 2 \times cr$
	$s1 = 0, s2 = 0$
Start of Loop	for $n = 0 : N-1$
	$s = x[n] + co \times s1 - s2$
	$s2 = s1$
	$s1 = s$
End of Loop	end
End	$power = s^2 + s1^2 - co \times s1 \times s2$

#### 4. 예제 신호를 이용한 검증

검증을 위해 그림 2(a)와 같이 고조파를 포함하는 왜곡된 예제 신호를 생성하였다. 이 때,  $f_0$ 는 60Hz로 설정하고, 3차, 5차, 7차, 9차, 11차, 13차, 15차 고조파 성분에 대해서 각각 25%, 20%, 15%, 10%, 7%, 5%, 3%의 HD를 가지도록 설정하였다. 먼저 이 신호를 기존의 FFT 기반 알고리즘을 적용하여 분석하고 각 차수별 고조파 성분을 얻어낸 결과를 그림 2(b)에 나타내었다. 최종적으로 Goertzel 기반 알고리즘을 사용하여 동일한 예제 신호에 대해 각 차수의 고조파별로 HD를 추정하였고 앞서 FFT 기반 방식을 사용하여 얻어진 HD와 비교한 결과를 표 2에 정리하였다.

간단한 비교 결과를 통해 제안한 방식이 무리없이 적용 가능한 방식임을 검증하였다.

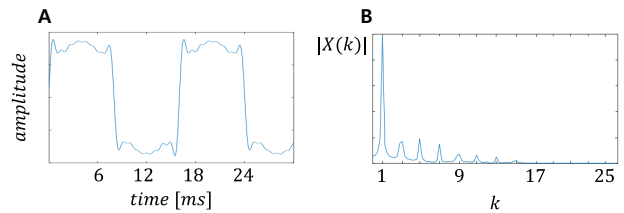


Fig. 2. Waveform of sample signal for verification A. time-series waveform, B. Frequency analysis with FFT.

그림 2. 검증을 위해 사용된 예제 신호의 파형 A. 시계열 웨이브, B. FFT 기반 주파수 분석

Table 2. Comparison of sample test results for each algorithm.

표 2. 알고리즘별 샘플테스트 결과 비교

Harmonics	HD (%)		
	Original signal	FFT	Goertzel
$f_0$	-	-	-
3 차	25	21.20	25.01
5 차	20	19.70	20.00
7 차	15	15.14	15.00
9 차	10	8.74	10.00
11 차	7	6.83	7.00
13 차	5	5.08	5.00
15 차	3	2.69	3.00

### III. 결론

본 논문에서는 전기자동차 충전시 발생하는 고조파 성분을 매우 높은 차수까지 추정하여 전력량을 계산하되 낮은 연산능력을 가지는 저가의 보급형 전력량계에서도 구동 가능하도록 일부 특정 주파수 성분에 대해서만 연산을 수행하는 방식의 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 사용하여 전력량 계량시 큰 차수의 고조파까지 충분히 고려할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였고 이러한 결과를 바탕으로 해당 요건을 갖춘 계량기의 단가를 낮추고 향후 전기자동차 충전기의 보급 과정에서 발생할 수 있는 경제적 어려움을 완화하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

### References

[1] Jae-Jo Lee, "Trends in international standardization of electric vehicle charging infrastructure

and domestic regulations,” KIPE(Korean Institute of Power Electronics) Magazine, vol.27, issue2, pp.50-55, 2022.

[2] Hyeong-Jin Kim, “Single-phase/three-phase combined non-electrolytic capacitor High-efficiency, high-power density electric vehicle charger,” KIPE (Korean Institute of Power Electronics) Magazine, vol.26, issue.5, pp.64-69, 2021.

[3] “Electric Vehicle Charger Technical Standards,” Notification of the Ministry of Trade, Industry and Energy, no.2020-017, 2020.

[4] Horlick ompany, “Horlick ompany”, <https://horlick.com/>

[5] Ji-Hun Kim, Hyeong-Wook Sim, Seong-Chul Ju, Jae-Won Lee, Chul-Hwan Kim, “Analysis of Harmonic Effects due to Charging of Electric vehicles,” *Proceedings of the KIEE Conference*, pp.79-80, 2011.

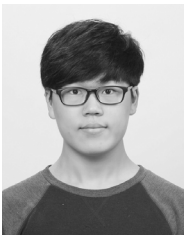
DOI: 10.1109/IGESC.2017.8283460

[6] Goertzel, G., “An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series,” *American Mathematical Monthly*, vol.65 no.1, pp.34-35, 1958.

DOI: 10.2307/2310304

## BIOGRAPHY

### Ukhyun Kim (Member)



2022 : B.S. degree in Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.

2022~Present : Master's student in Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.

### Kyungeun Kim (Member)



2020~Present : Undergraduate in Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.

### Sangwook Park (Member)



2012 : B.S. degree in Electronics and Electrical Engineering, Chung-Ang Univ.

2017 : Ph. D degree in Electrical and Computer Engineering, Korea Univ.

2017.11~2018.08 : Research Professor, Korea University.

2018.09~2022.02: PostDoc. Fellow, Johns Hopkins University.

2022.03~Present: Assistant Professor in Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.

### Young Lae Kim (Member)



2013 : Ph. D degree in Electrical and Computer Engineering, Northeastern University.

2018.03~Present : Associate professor in Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.

### Jooyoung Jeon (Member)



1999 : B.S. degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

2001 : M.S. degree in Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University.

2009 : Ph.D degree in Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University.

2020.03~Present : Assistant professor in Electronic Engineering, Gangneung-Wonju National University.