J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 35, No. 6, pp. 568-575 November 2022
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.6.5
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

ESS의 전자 잡음 주파수 분석 및 제거

안봉만[1], 한병성[1], 한운기[2], 이영관[3], 안현진[4]

[1] 전북대학교 산학협력단

[2] 위에너지

[3] 세이브에너지

[4] 한국서부발전

Frequency Analysis and Reduction of Electronic Noise in ESS

Bong Man Ahn[1], Byoung Sung Han[1], Un Ki Han[2], Young Kwan Lee[3], and Hyun Jin An[4]

[1] Industrial Cooperation Foundation, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

[2] We Energy co., LTD., Jeonju 54858, Korea

[3] Save Energy co., LTD., Wanju 55367, Korea

[4] Korea Western Power co., LTD., Taean 32140, Korea

(Received August 3, 2022; Accepted August 18, 2022)

Abstract: This paper is a study on frequency analysis and electronic noise reduction of energy storage system (ESS). We acquired 4 necessary data for about 2 minutes and 4 seconds using a sampling frequency of 10,000 Hz in ESS. Fast Fourier transform (FFT) was used for electronic noise analysis from the acquired data. As a result, it was confirmed that DC component, fundamental wave, second and higher harmonic component exist. For the attenuation of harmonics, low-pass filter (LPF) was applied. We confirmed that an attenuation of approximately 59.3% appears from the second harmonic. The presence of many harmonic components in the data of the ESS was expected to occur due to the insufficiency of optimization among the modules inside the ESS. Therefore, we propose that a national certification system for ESS should be introduced to settle down the issue properly.

Keywords: ESS, Electronic noise reduction, FFT, LPF

1. 서 론

에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)은 생산된 전력을 충전했다가 전력공급자와 소비자간의 실시간 정보교환을 통해 필요한 전력을 공급함으로써 안정적인 공급을 통해 에너지의 효율을 높이고자 하는 시스템이다. 전력계통에서 ESS의 역할은 주파수 조정, 피크부하 감소 및 신재생 에너지 출력 안정화 등이 있다 [1].

2018년 ESS 설치가 급격히 증가하면서 ESS내 화재사고가 발생, 2년여 동안 28건의 건수가 보고되었다. 이들 전체 사고 중 신재생에너지 연계용 ESS에서 발생한 화재가 22건으로 가장 많았으며, 피크 제어 4건, 주파수 조정 2건으로 나타났다. 이에 산업통상자원부는 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회를 구성하여 “ESS 사고원인 조사

✉ Bong Man Ahn; bmahn113@naver.com

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
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.

결과 및 안전강화 대책"을 발표한바 있으나 이후에도 5건의 화재가 연이어 발생하자 근본적인 문제 해결이 이루어지지 않았다는 지적이 제기 된 바 있다.

ESS 화재 요인으로 추정되는 것에는 전기적 충격에 대한 보호체계 미흡, 배터리 시스템 결함, ESS 통합 관리체계 부재, 운용환경 관리 미흡 및 설치 부주의를 들고 있다. 이중 전기적 충격에 대한 보호체계 미흡에 대한 결과로는 배터리 보호장치 내 다수 부품이 손상되어 단락 되고, 배터리 rack 보호장치 내에 있는 직류접촉기가 파괴되며, 부스바(busbar)가 파손되어 배터리 rack 보호장치의 외 함을 타격하는 2차 단락이 발생하여 동시 다발적으로 화재가 발생했다는 보고가 있다 [2]. 실제로 전력기기에서 전자파 밀집도 증가로 인하여 기기가 본래의 목적과 다르게 동작함으로써 사회에 혼란을 초래한 경우가 종종 있다 [3]. 본 연구는 ESS 내부에서 발생하는 전자잡음들이 화재의 원인이 될 수 있다는 생각에서, ESS 내 전자잡음에 어떤 고조파 성분들이 존재하는가를 확인한 후 고조파를 제거하는 것을 목표로 진행하였다.

정부가 ESS용 대용량 배터리 및 전력변환장치(power converter system, PCS)를 안전관리 의무대상으로 지정함에 따라 본 연구에서는 PCS 주변 체크포인트 4곳에서 데이터를 취득하여 주파수 분석을 하였다. PCS 입출력 지점 4곳을 선정한 이유는 충방전시 이 곳에서 가장 큰 전자잡음이 발생하기 때문이다.

주파수 분석 결과 취득한 4곳의 데이터에 DC 성분, 2차 고조파 및 그 이상의 고조파 성분들이 포함되어 있음을 확인하였다. 이러한 고조파 성분들은 기본파인 정현파를 왜곡시키며 고조파 가열효과, 고조파에 의한 과전압, 고조파에 의한 공진 및 고조파 간섭 등을 일으키는 원인이 될 수 있다. 이들 고조파에 대한 대책으로는 리액턴스 설치, 커패시터 설치, 변환기 다펄스화, PWM (pulse width modulation) 컨버터 채용, 필터설치, 계통분리, 고조파 내량 증가 및 단락용량의 증대등과 같은 방법이 사용되고 있다.

본 연구의 2.1절에서는 고조파 성분을 제거할 수 있는 간단한 아날로그 LPF로부터 디지털 LPF로 등가적으로 변환하는 방법에 대하여 논하였다. LPF란 0Hz에서 차단주파수까지는 크기 감쇄가 거의 없이 통과시키고 차단 주파수 이상의 주파수부터는 감쇄가 크게 일어나게 하는 일련의 회로망을 말한다. 2.2절에서는 데이터 취득에 관련된 사항을 기술하였다. 그리고 디지털 LPF를 사용하여 고조파 성분들을 저감 시킬 수 있는지 여부를 살펴보았다. 3절에서 결론과 고찰을 나타내었다.

2. 연구방법

2.1 아날로그 LPF 의 등가변환

본 절은 아날로그 LPF를 디지털 LPF로 등가적으로 변환하는 과정을 설명한다 [4,5]. 이는 디지털 LPF를 이용하여 ESS 시스템에서 획득한 전자 잡음의 고조파 제거 결과를 확인하기 위한 것이다.

일반적인 아날로그 LPF의 형태는 식 (1)과 같다.

$$H(s) = \frac{\alpha}{s+\alpha} \tag{1}$$

여기서 $H(s)$는 라플라스 변환으로 표현된 아날로그 LPF의 전달함수를 나타낸다.

위의 식은 아날로그 형식이므로 디지털 형식으로 변환하기 위하여 $H(s)$를 미분방정식으로 표현했다.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s/\alpha+1} \tag{2}$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)을 이용, 역 라플라스 변환을 통해 미분방정식으로 바꾸면 식 (4)와 같다.

$$\tau\frac{d}{dt}y(t) + y(t) = x(t) \tag{4}$$

ESS에서 얻은 신호들은 디지털 신호이기 때문에 식 (4)를 바로 적용할 수 없다. 식 (4)의 미분방정식을 차분방정식으로 등가 변환해야 한다. 먼저 $y(t)$에 대한 1차 미분, $y(t)$ 및 $x(t)$을 차분방정식 형태로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}y(t) \Leftrightarrow \frac{y(n)-y(n-1)}{\Delta t} \tag{5a}$$

$$y(t) \Leftrightarrow y(n) \tag{5b}$$

$$x(t) \Leftrightarrow x(n) \tag{5c}$$

식 (4)에 식 (5)를 대입하여 정리하면 식 (6)이 된다.

$$\tau\frac{y(n)-y(n-1)}{\Delta t} + y(n) = x(n) \tag{6}$$

식 (6)에서 $y(n)$을 좌변으로 하고 나머지 항들을 우변으로 하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$y(n) = \frac{\tau}{\tau+\Delta t}y(n-1) + \frac{\Delta t}{\tau+\Delta t}x(n) \tag{7}$$

디지털 신호 수열에서 샘플과 샘플 사이의 시간 간격 Δt는 식 (8)과 같다.

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{10{,}000} = 0.0001 \tag{8}$$

아날로그 필터의 차단 각주파수 α는 기본파 60 Hz, 제2고조파 120 Hz와 중간인 $f_c = 90$ Hz로 하였다.

$$\alpha = 2\pi f_c = 565.4867 \tag{9}$$

식 (1)에 식 (9)를 대입하여 얻은 LPF 특성은 그림 1과 같다. 그림 1의 Y축 단위는 로그 선형 스케일이다. 그러므로 차단 주파수는 크기가 0.707일 때 결정된다. 이때 ω는 567.49 rad/sec이다. 그림 1은 Matlab사의 freqs 함수를 이용하여 도시하였다.

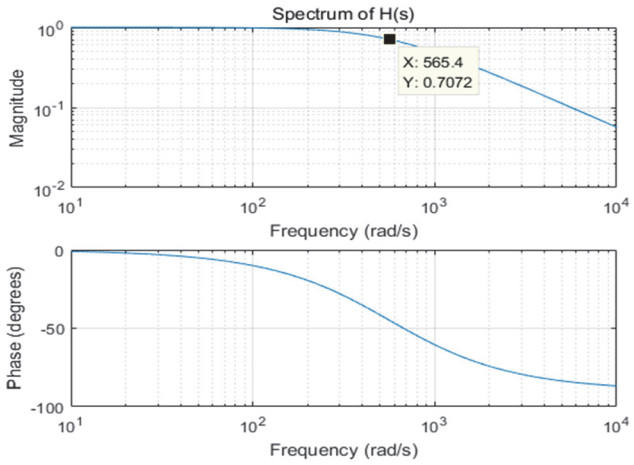


Fig. 1. Characteristic curves of low pass filter ($f_c = 90$ Hz).

2.2 디지털 LPF를 이용한 전자 잡음 신호분석

충방전시 전자잡음이 가장 크게 발생하는 4개 체크 포인트를 그림 2와 같이 선정하여 샘플링 주파수 $f_s = 10{,}000$ Hz로 104.8574초 동안 1,048,576개의 데이터를 수집하였다. 이 샘플링 주파수는 밴드폭이 0~5,000 Hz(83차 고조파에 해당)까지 관측이 유효하다.

실증 사이트의 ESS의 스펙은 표 1과 같으며 그림 2에 ESS내 전압을 측정한 4곳의 위치(U1, U2, U3 및 U4)를 표시하였다. 전압 및 전류 취득을 위한 센서 설치는 그림 3(a), (b)와 같다. 이때 Dewetron사의 데이터 수집 시스템 및 Oxygen 소프트웨어를 이용하였다. 전류센서는 홀 타입 PA-IT-65-S와 PA-IT-700-S를 사용했다.

그림 4는 Dewetron사의 데이터 수집 시스템에서 기본적으로 제공하는 그림을 캡처하여 나타낸 것이다. ESS가 충방전 시 PCS가 동작하면서 잡음이 발생하는데 이 잡음에 포함된 고조파 성분을 파악하기 위하여 PCS를 기준으로 1차측과 2차측에서 데이터를 얻었다. 주파수 분석에서 1,048,576 포인트 FFT [6]를 적용하기에는 컴퓨터 자원 부족으로 그림 4의 원시 데이터를 적절하게 절단하여 사용하였다. 주파수 분석에는 Matlab사의 FFT 함수를 이용하였으며 LPF는 자체 코드를 생성하여 수행하였다.

Table 1. Specifications of the ESS.

Item	Specification
Battery capacity	275 kWh
PCS capacity	80 kW
Capacity of solar modules	About 100 kW

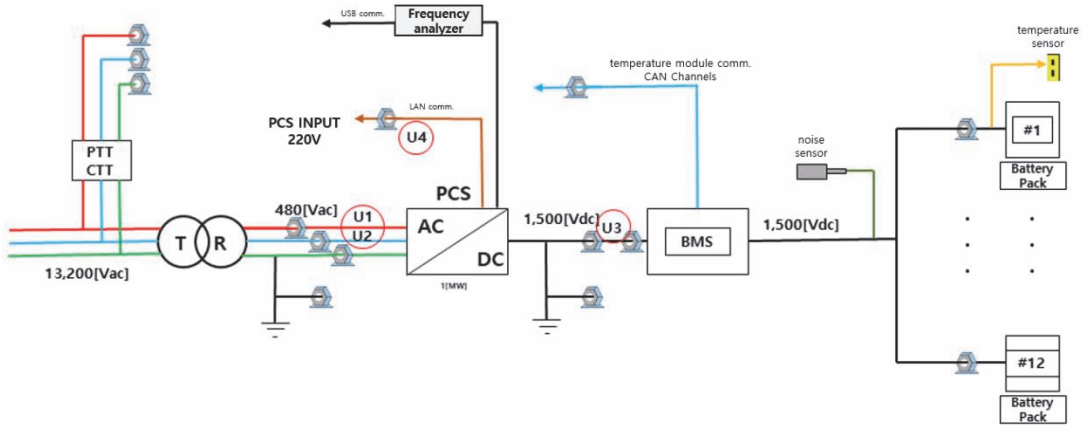


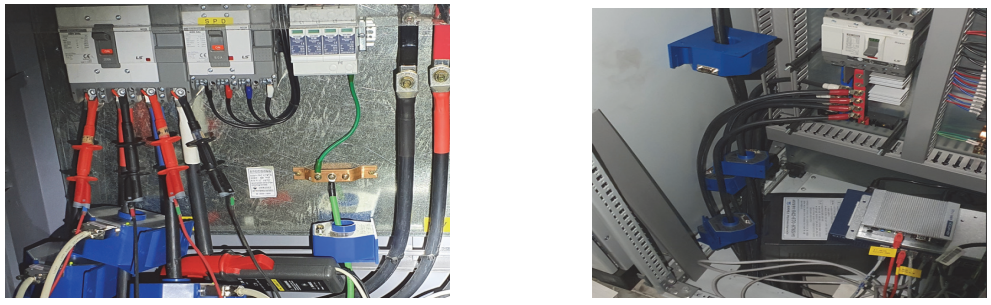
Fig. 2. 4 Checkpoints of ESS.

체크 포인트 U1(그림 4(a))에 대한 절단된 시간영역 그래프는 그림 5(a)와 같다.

그림 5(b)와 (c)의 Y축은 스펙트럼 크기를 선형적으로 나타낸 것이며, 피크 값의 주파수별 크기는 표 2와 같다.

감쇄비율(decay rate)은 다음과 같이하여 계산하였다.

$$\text{Decay rate}(\%) = 100 - \frac{Magn.of\ (c)}{Magn.of\ (b)} \times 100 \quad (10)$$



(a) Voltage measurement (b) Current measurement

Fig. 3. Voltage and current measurement using dewetron's data acquisition system.

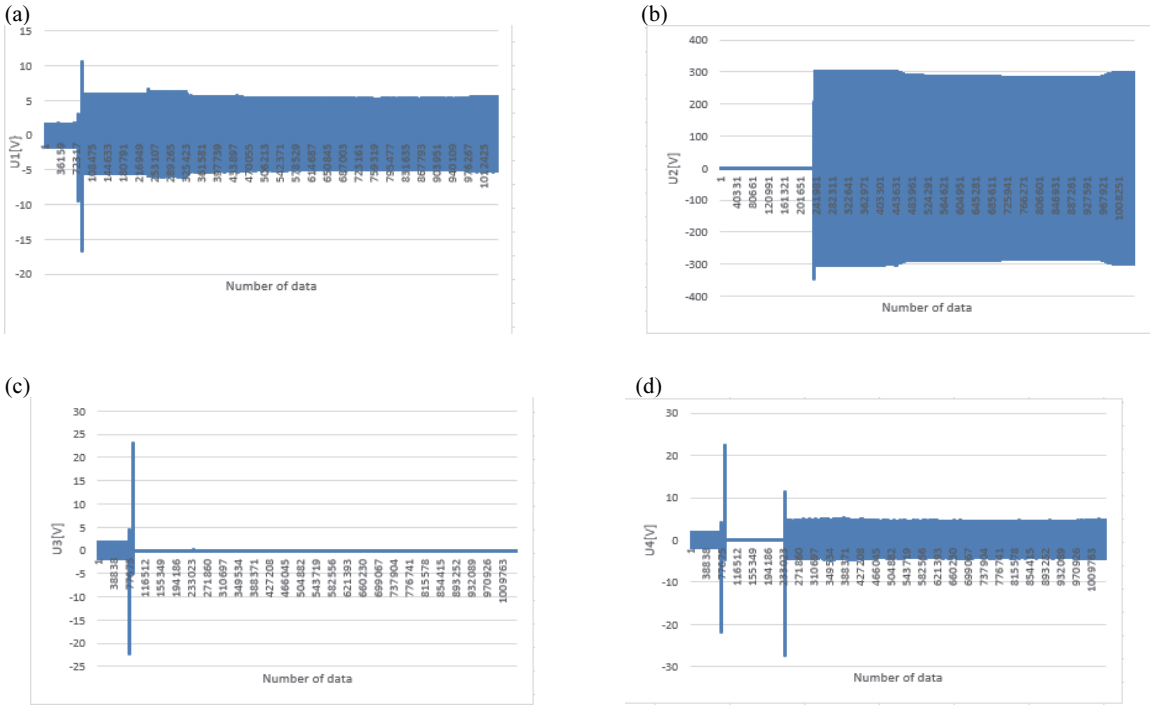


Fig. 4. Low data of checkpoint U1, U2, U3 and U4. (a) Checkpoint U1, (b) checkpoint U2, (c) checkpoint U3, (d) and checkpoint U4.

Table 2. Spectral magnitude by peak frequency in U1.

Freq.	0.01667	60.02	120.1	180.1	240.1	300.1	360.1	420.1	480.1
Magn. of (b)	0.2313	49.5	3.576	2.079	0.6778	1.431	0.5605	2.985	0.3298
Magn. of (c)	0.2232	40.83	2.105	0.9133	0.3093	0.3746	0.1336	0.6092	0.0584
Decay rate	3.5	17.5	41.1	56.1	54.4	73.8	76.2	79.6	82.3

체크 포인트 U1에는 기본파인 60 Hz 성분만 존재하여야 한다. 그런데 기본파와 다양한 고조파 성분이 포함되어 있다(그림 5(b)). 표 2에서 0.01667 Hz는 그림 4(a) 파형의 포락선(envelope)에 해당하는 성분으로 판단된다. LPF를 사용한 데이터의 스펙트럼 분석 결과 2차 고조파부터 상당한 감쇄가 있음을 알 수 있다.

그림 6은 그림 4(b)에 대한 절단된 시간과 주파수 영역 그래프를 나타낸 것이다. 이때의 체크 포인트는 U2이다. 체크 포인트 U2(그림 4(b))는 기본파인 60 Hz 성분만 존재하여야 한다.

그림 6의 (b)와 (c)의 피크 값을 가지는 주파수의 크기와 감쇄 비율을 표 3에 나타내었다.

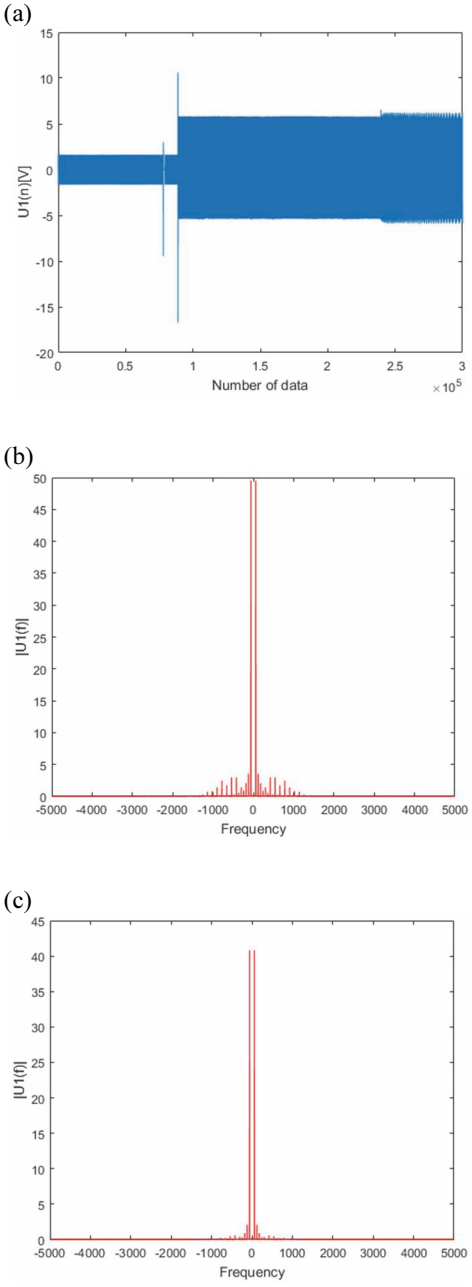


Fig. 5. Graph at checkpoint U1. (a) Time domain data at U1, (b) spectrum of U1 data, and (c) spectrum of filtered U1 data.

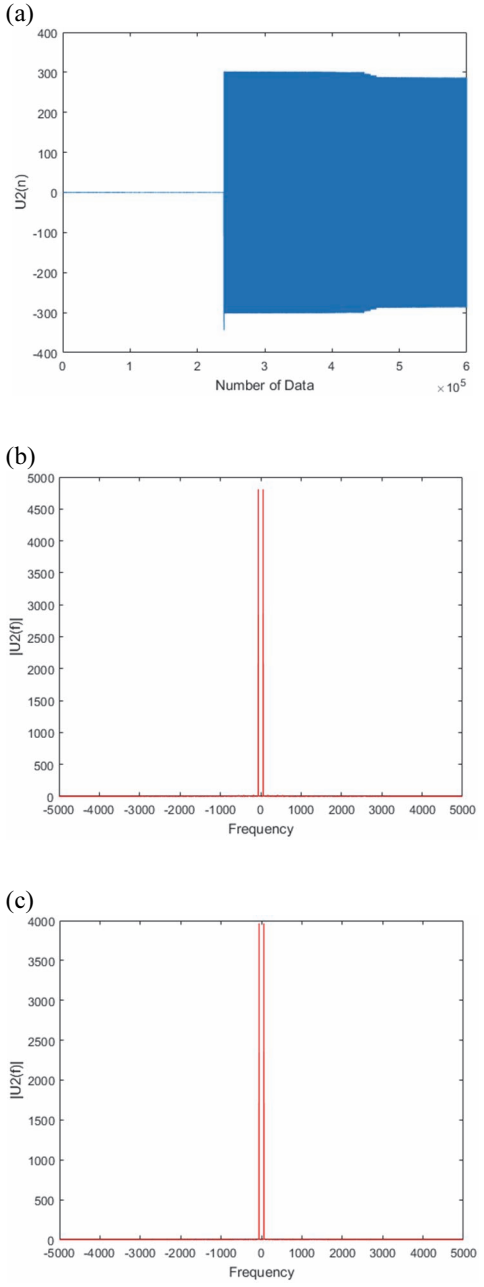


Fig. 6. Graph at checkpoint U2. (a) Time domain data at U2, (b) spectrum of U2 data, and (c) spectrum of filtered U2 data.

Table 3. Spectral magnitude by peak frequency in U2.

Freq.	0.0	60	120	180	240	300	360	420	480
Magn. of (b)	1.555	4807	0	25.2	0	15.57	0	23.57	0
Magn. of (c)	1.555	3965	0	10.86	0	4.666	0	4.9	0
Decay rate	0	17.516	0	56.9	0	790.3	0	79.2	0

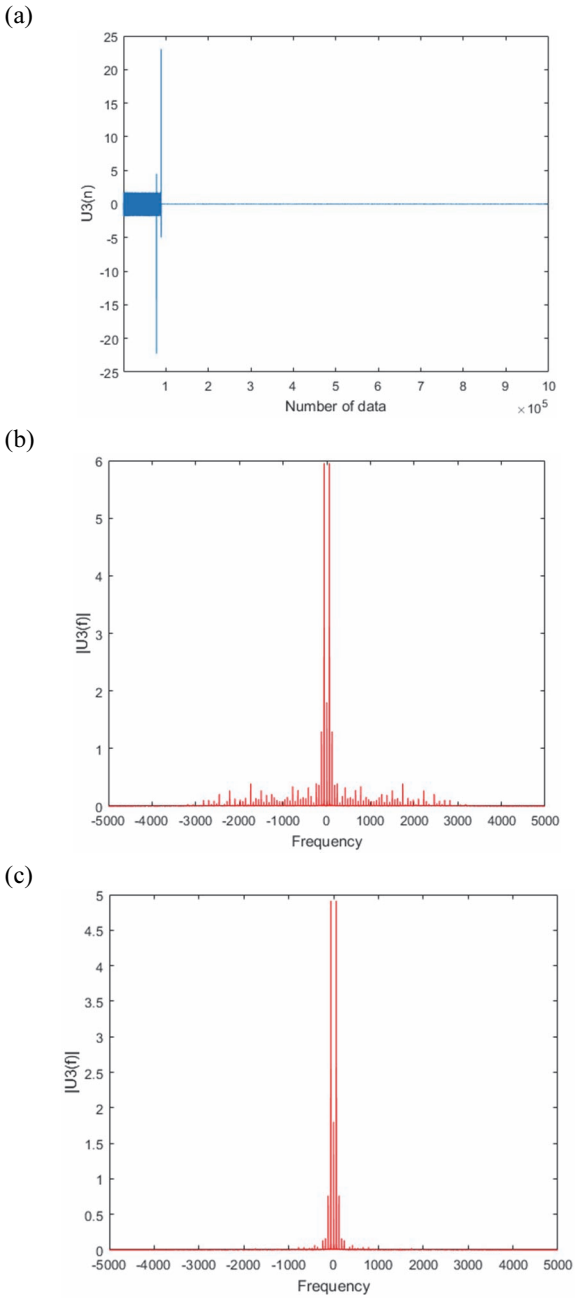


Fig. 7. Graph of checkpoint U3. (a) Time domain data at U3, (b) spectrum of U3 data, and (c) spectrum of filtered U3 data.

표 3에서 0 Hz의 스펙트럼의 크기가 기본파인 60 Hz의 크기에 비하여 작은 1.555를 가지고 있음을 확인하였다. 주파수 분석에서는 60.0 Hz에서 가장 큰 피크치 4,807이 나타남을 알 수 있다. 그리고 인버터 특징으로 우수고조파 성분들이 서로 상쇄되어 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 LPF를 사용한 데이터(표 3)의 스펙트럼에서 기본파는 17.5%가 감쇄하였으며 3차 고조파는 56.9%의 감쇄가 있음을 알 수 있다.

그림 4(c)의 절단된 부분이 그림 7(a)이다. 이때는 체크포인트가 U3이다. 체크 포인트 U3는 DC성분만 존재하여야 한다.

그림 7(b)와 (c)의 피크 값을 갖는 주파수의 크기와 감쇄 비율을 표 4에 나타내었다. 그림 7(b)와 표 4에서 60 Hz 성분의 크기가 DC 성분의 크기보다 큼을 알 수 있다. 또한 많은 수의 고조파 성분이 존재함을 알 수 있다. 표 4에 그림 7(b)와 (c)의 스펙트럼 크기와 감쇄 비율을 정리하였다. 표 7에서 기본파는 17.5%의 감쇄하였고, 2차 고조파 39%, 3차 고조파 57.5% 정도 감쇄하였다. 또 3차 고조파부터는 그 감쇄 크기가 더욱 큼을 알 수 있다. 그림 7(b)와 (c)에서 LPF가 고조파 성분을 효과적으로 감쇄시킴을 확인하였다.

체크 포인트 U4의 시간영역 그래프는 그림 4(d)이다. 주파수 영역을 분석을 위한 절단된 그림이 그림 8(a)이다. 체크 포인트 U4의 경우 AC 성분만 존재하는 것이 이상적이나, DC 성분과 많은 수의 고조파 성분이 존재하고 있다(그림 8(b)).

표 5에 그림 8(b)와 (c)의 스펙트럼 크기를 피크별로 정리하였다. LPF가 고조파 성분을 효과적으로 감쇄시킴을 확인하였다.

그림 8(b)의 확대하여 확인한 결과 0.01667 Hz 성분에서 3,541 Hz(약 59차 고조파)까지 존재함을 알 수 있었다. 표 5에서 DC 성분에 FFT 계산 오차로 인하여 크기가 0.8% 증가하였고 기본파는 17.5%의 감쇄가 있었으며 2차 고조파는 36.6% 정도 감쇄하였다.

그림 9에는 그림 8의 0 Hz에서 150 Hz까지의 크기 스펙트럼을 확대하여 나타내었다. 60 Hz 부근에서 많은 주파수 성분이 존재함을 알 수 있다. 60 Hz 인근에 존재하는(그림 9) 다수의 주파수 성분의 발생 원인과 이들이 시스템에 미치는 영향 등에 대한 연구는 추후에 계속할 예정이다.

Table 4. Spectral magnitude by peak frequency in U3.

Freq.	0.0	60.004	120.0	180.1	240.1	300.1	360.1	420.1	480.1
Magn. of (b)	1.802	5.949	1.25	0.3703	0.3725	0.06458	0.1677	0.3212	0.1325
Magn. of (c)	1.802	4.907	0.7628	0.1575	0.1146	0.01637	0.04097	0.06572	0.02499
Decay rate	0.0	17.5	39.0	57.5	69.2	74.7	75.6	79.5	81.1

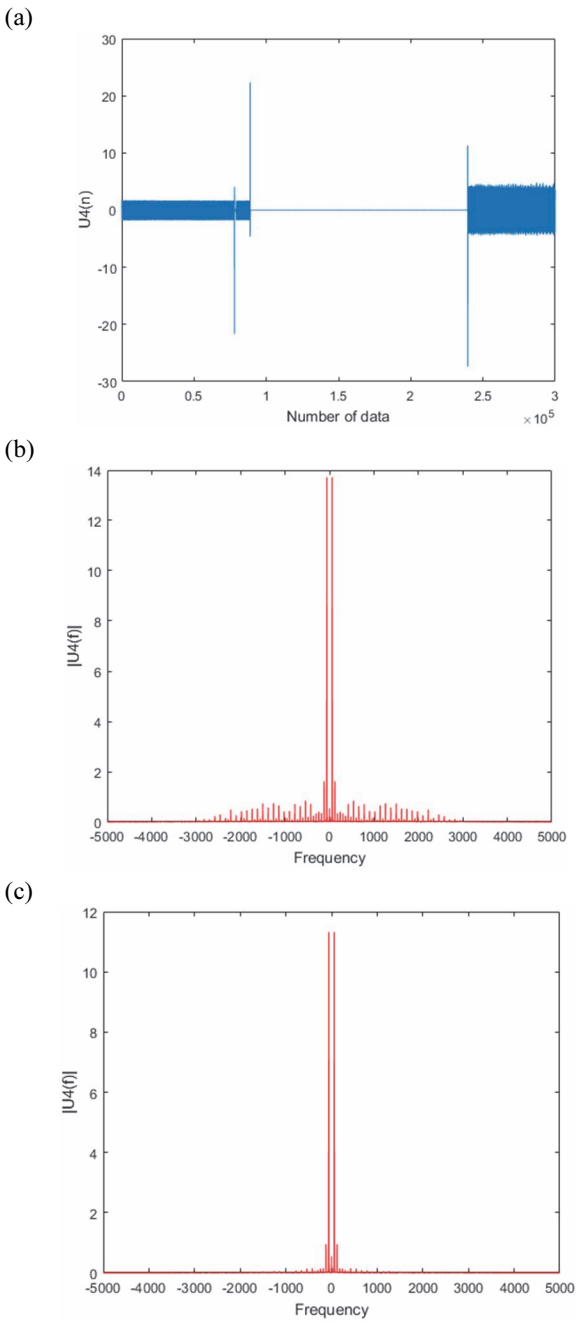


Fig. 8. Graph of checkpoint U4. (a) Time domain data at U4, (b) spectrum of U4 data, and (c) spectrum of filtered U4 data.

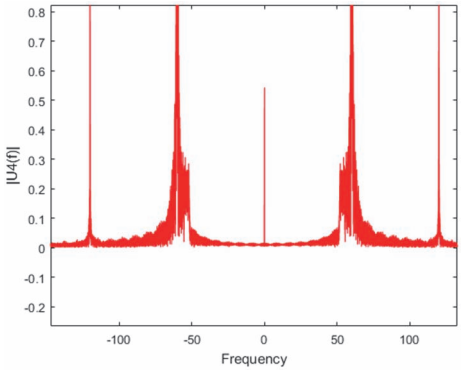


Fig. 9. Spectrum near 60 Hz at checkpoint U4.

3. 결론 및 고찰

4곳의 체크 포인트에서 수집한 각각의 데이터를 분석한 결과 다수의 고조파 성분이 존재함을 확인하였다. 이처럼 ESS에 고조파 성분이 존재한다는 것은 ESS의 오동작은 물론 화재 발생 및 제어관련 통신에 장애를 일으키는 원인이 될 수 있다.

한편 전력 전송시스템에서 고조파에 따른 전력품질 기준으로 3차(180 Hz), 5차(300 Hz), 7차(420 Hz)다. 주파수 분석 결과 체크 포인트 U1, U3 및 U4에서 이러한 고주파 성분이 존재함을 확인하였다. 물론 이러한 기준을 ESS 시스템에 동일하게 적용하는 것은 합리적이지 않다고 생각한다.

일반 송전계통에서는 DC 성분이 주울 열로 바뀌어 없어지지 만 ESS에서는 각각의 내부 모듈에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다. 이에 ESS 내 고조파 제거 또는 억압에 대한 적절한 대책이 조속히 마련되어야 한다.

각각의 체크 포인트에서 얻어진 데이터에 LPF을 적용한 바, 2차 고조파는 제거율이 36.6%이고 3차 고조파는 66.9%이며 고차 고조파인 경우 감쇄율이 더욱 크다. 만일 통과 대역이 평평하고 차단 대역이 날카로운 LPF나 기본파 60 Hz가 중심 주파수인 날카로운 대역 통과 특성을 갖는 필터를 사용한다면 더 좋은 고조파 제거 효과를 얻을 수 있을 것이다.

결론적으로 ESS 내부의 각 모듈의 출력 단에 적절한 저

Table 5. Spectral magnitude by peak frequency in U4.

Freq.	0.01667	59.98	119.9	180.1	240.1	300.1	360.1	420.1	480.1
Magn. of (b)	0.5432	13.72	1.5	0.3291	0.383	0.3421	0.246	0.6355	0.2052
Magn. of (c)	0.5478	11.32	0.9516	0.1089	0.1364	0.09086	0.05715	0.1476	0.03765
Decay rate	-0.8	17.5	36.6	66.9	64.4	73.4	76.8	76.8	81.7

역 또는 대역 통과 필터를 사용하여 다음 단 모듈 입력에 필요한 주파수 성분만 전달하게 한다면 ESS 내에서 발생하는 고조파를 적절히 제거할 수 있으며, 이를 통해 보다 안전하게 ESS를 운영할 수 있을 것이다.

ESS의 모듈 제조사는 모듈의 정확한 특성 데이터를 ESS SI (system integration) 업체에 제공해야 하며, 이를 통해 ESS의 모듈 구성이 최적화 되어야할 것이다. 그리고 조속히 ESS 내의 모듈 규격 검사와 모듈과 모듈 연결 시 비 최적화로 발생할 수 있는 문제에 대한 책임 소재를 분명히 할 수 있는 ESS 인증 제도가 마련되어야 한다.

ORCID

Bong Man Ahn https://orcid.org/0000-0001-7460-3742

감사의 글

본 연구는 한국서부발전의 2020년 “ESS 전자 잡음에 의한 사고방지 및 진단시스템 개발” 과제 연구비에 의해 지원되었음.

REFERENCES

[1] Energy Storage, https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_storage.

[2] B. W. Lee, A Study on the Analysis and Solution of ESS System Fire Cause, Hanyang Univ., *Master's thesis*, 2020.

[3] D. Y. Kim, An Estimation on Radiation Noise Produced by Conducted Noise, Nat'l Korea maritime & ocean univ., *Master's thesis*, 2004.

[4] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. Hamid Nawab, *Signals & Systems* (Prentice-Hall, 1996).

[5] P. Kim and L. Huh, *Kalman Filter for Beginners: With MATLAB Examples*, (Corpus ID: 0431340, 2011).

[6] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, *Discrete-Time Signal Processing 3/e*, (Prentice Hall, 2011)