

## ESS 잔존수명 추정 모델 경량화 연구

유정운\*, 박성원\*\*, 손성용\*\*\*

### Lightweight Model for Energy Storage System Remaining Useful Lifetime Estimation

Jung-Un Yu\*, Sung-Won Park\*\*, Sung-Yong Son\*\*\*

**요약** ESS(energy storage system)는 재생에너지 자원의 증가 등의 영향에 따라 최근 다양한 분야에서 중요한 전력원으로 자리 잡고 있다. ESS는 사용에 따라 가용 용량이 지속적으로 감소하므로 잔존수명을 관리하는 것이 중요하다. 잔존수명의 추정을 위하여 주기적으로 점검자가 확인하는 방식이 사용될 수도 있으나, 관리시스템을 통하여 자동으로 모니터링되고 관리되는 것이 일반적이다. ESS 사업자 관점에서 정확도 높은 상태추정은 경제적, 효율적 운용을 위하여 중요하다. 잔존수명 추정 모델은 운영에 따른 사이클 노후화와 기간 경과에 따른 캘린더 노후화를 고려하여 구성되며 복잡한 수학적 연산을 필요로 한다. ESS에 탑재되는 저비용 저성능의 프로세서에 잔존수명 추정모델의 적용을 위해서는 모델의 적절한 경량화 방안이 요구된다. 본 논문에서는 낮은 수준의 프로세서에서 연산이 용이하도록 ESS 잔존수명예측 모델을 경량화하였다. 시뮬레이션 평가 결과 ESS 잔존수명 추정 기준모델과 제안하는 모델간 오차는 1% 이내로 나타났다. 또한, 제안된 모델의 성능개선 효과 검증을 위하여 ATmega328을 기반으로 비교 평가를 수행하였을 때, 76.8~78.3%의 컴퓨팅 시간 단축을 확인하였다.

**Abstract** ESS(energy storage system) has recently become an important power source in various areas due to increased renewable energy resources. The more ESS is used, the less the effective capacity of the ESS. Therefore, it is important to manage the remaining useful lifetime(RUL). RUL can be checked regularly by inspectors, but it is common to be monitored and estimated by an automated monitoring system. The accurate state estimation is important to ESS operator for economical and efficient operation. RUL estimation model usually requires complex mathematical calculations consisting of cycle aging and calendar aging that are caused by the operation frequency and over time, respectively. A lightweight RUL estimation model is required to be embedded in low-performance processors that are installed on ESS. In this paper, a lightweight ESS RUL estimation model is proposed to operate on low-performance micro-processors. The simulation results show less than 1% errors compared to the original RUL model case. In addition, a performance analysis is conducted based on ATmega 328. The results show 76.8 to 78.3 % of computational time reduction.

**Key Words** : Energy storage system, Lightweight, Linearization, Lithium-ion battery, Remaining Useful Lifetime(RUL) estimation

#### 1. 서론

전력시스템은 종래의 중앙 집중형 형태에서 신재생

에너지원, 전기자동차 등과 같은 분산전원의 증가에 따라 새로운 변화를 맞게 되었다[1]. 그 중 ESS(energy storage system)는 재생에너지 자원의 증가 등의 영

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194310100060), and the Gachon University research fund of 2017 (GCU-2017-0603).

\*Department of Electrical Engineering, Gachon University(kora@gachon.ac.kr)

\*\*Department of Electronic and Electrical Engineering, Youngsan University(swpark@ysu.ac.kr)

\*\*\*Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Gachon University(xtra@gachon.ac.kr)

Received October 06, 2020

Revised October 22, 2020

Accepted October 23, 2020

향에 따라 최근 광범위한 분야에 중요한 전력자원으로 자리 잡고 있다[2]. 세계 ESS 시장은 2025년까지 연간 30%씩 지속적으로 성장 추세를 보이고 있으며, 미국, 호주 등 대규모 정전사태 및 재생에너지 확대에 의한 계통의 불안정성을 완화하기 위한 대책으로 ESS의 보급이 활성화 되고 있다[3].

ESS는 충·방전을 거듭함에 따라 배터리 용량이 점차 저하되며, 초기 용량 대비 70-80% 이하로 떨어지면 수명이 다한 것으로 간주된다[4]. ESS시스템의 구축비용 중 배터리의 비중은 전체 비용의 약 60% 이상을 차지한다[5]. 따라서 보다 장기적인 ESS 운영을 통한 경제적 이익증대를 위해서는 ESS를 구성하는 배터리의 수명을 고려한 ESS 운영 방법 및 이를 위한 배터리 잔존 수명 추정 모델이 필요하다.

배터리 잔존수명은 배터리의 사이클 노후화(cycle aging) 및 캘린더 노후화(calendar aging)에 따른 열화 영향을 고려하여 추정된다[6]. 배터리 잔존수명에 영향을 미치는 주요 요소로는 state of charge(SoC), depth of charge(DoD), C-rate, 온도 등이 있으며, 이를 고려하여 배터리 잔존수명을 추정하거나 운영에 활용하는 연구가 진행되었다[7-9]. [7]에서는 SoC, C-rate, DoD, 온도, 운영시간 등을 고려한 요인별 스트레스 모델을 기반으로 배터리 잔존수명 모델을 제시하고 배터리 운영 실 데이터와 비교하여 성능을 검증하였다. [8]에서는 주기적으로 발생하는 수명 감소 모델과 캘린더 노후화 모델에 대한 곡선 피팅 결과를 기반으로 충방전 스케줄에 따른 잔존수명 예측 방법을 제시하였다. [9]에서는 배터리 구조 시스템을 등가 모델링하고, 사이클 횟수의 증가와 열에 의한 동적 영향을 집중적으로 고려하여 잔존 수명을 정식화 하였다.

배터리의 잔존수명을 정확하게 추정하는 것은 운영의 경제성 측면에서 중요하지만 배터리 잔존수명만의 추정을 위하여 고가의 프로세서를 사용하는 것은 비효율을 적이다. 또한 기술적으로 마이크로 컨트롤러 유닛(Micro Controller Unit; MCU)과 같이 최소한의 컴퓨팅 요소를 내장한 모니터링 장비를 탑재할 경우 복잡한 수식을 적용하는 경우 연산에 많은 노력이 소요되거나 상대적으로 높은 가격이나 성능의 프로세서가 필요하게 된다. 따라서 잔존수명 추정 모델의 경량화를

통해 연산속도를 개선하고, 필드에서 사용되는 설비에 탑재되는 프로세서의 요구사항을 낮추어 경제성을 확보할 수 있는 방안이 필요하다.

본 연구에서 배터리 잔존수명에 대한 수식의 복잡성을 최소화하기 위해 1장에서는 사이클 노후화와 캘린더 노후화에 대한 기존 모델에 대한 연구 조사를 실시하였으며, 2장에서는 배터리 노후화에 영향을 미치는 SoC, C-rate, DoD를 고려한 대표적인 모델의 정의하였다. 3장에서는 선형화 및 모델의 경량화 방안을 제시하였다. 4장에서는 비선형 모델 대비 경량화 모델의 정확도 및 성능 개선 효과를 Atmega328 환경에서 분석하였다. 5장에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시하였다.

## 2. 배터리 잔존수명 추정 모델

### 2.1 잔존수명 추정 모델

배터리 종류로는 리튬이온배터리가 주로 사용된다. [7]에서는 배터리 잔존수명 추정 모델을 운영에 따른 노후화 영향을 Arrhenius 방정식의 열 영향을 고려하여 SoC, C-rate, SoC 영향을 다음과 같이 정의하고 있으며, 식(1)-(3)과 같이 표현된다.

$$f_{SoC}(SoC_i) = e^{k_{SoC}(SoC_i - SoC_{ref})} \quad (1)$$

$$f_{CR}(CR_i) = e^{k_{CR}(CR_i - CR_{ref})} \quad (2)$$

$$f_{DoD}(DoD_i) = (k_{DoD,1}DoD_i^{-k_{DoD,2}} - k_{DoD,3})^{-1} \quad (3)$$

여기서 식(1)의  $SoC_i$ 는  $i$ 번째 사이클 운용 중 SoC 값이며  $SoC_{ref}$ 는 기준 SoC,  $k_{SoC}$ 는 SoC 수명저하 파라미터이다. 식(2)의  $CR_i$ 는  $i$ 번째 사이클 운용 중 CR 값이며  $CR_{ref}$ 는 기준 C-rate,  $k_{CR}$ 은 CR 수명저하 파라미터이다. 식(3)의  $DoD_i$ 는  $i$ 번째 사이클 운용 중 DoD 값이며,  $k_{DoD,1}$ ,  $k_{DoD,2}$ ,  $k_{DoD,3}$ 는 DoD 수명저하 파라미터이다.

$$E_{max}^{(n+1)} = r_1 e^{-r_2 \sum_{q=1}^n (Deg_n)} - (1-r_1) e^{-\sum_{q=1}^n (Deg_n)} \quad (4)$$

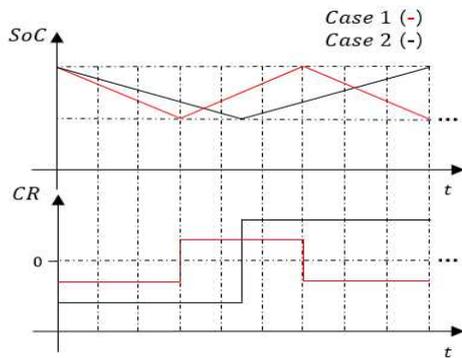
$$Deg_n = \sum_{i=1}^n f_{SoC}(SoC_i) f_{CR}(CR_i) f_{DoD}(DoD_i) + kT \quad (5)$$

여기서 식(4)의  $E_{max}^n$ 는 캘린더, 사이클 노후화 단계에 따라  $(n+1)$ 회 시점의 잔존수명을 의미하며,  $r_1$ ,

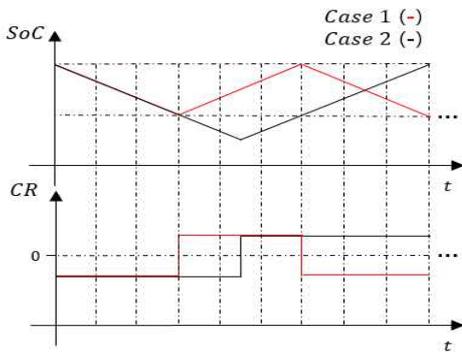
$r_2$ 는 전극의 안정성에 영향을 미치는 Solid Electrolyte Interphase(SEI) 모델 파라미터이다. 식 (5)는 식(4) 계산 시 사용되는 노후화 함수이며, 단위 시간 구간  $i$ ,  $n$ ,  $\eta$ 와 운영 기간  $T$ 에 따라 정의되며,  $Deg_n$  내 함수는 식(1)-(3)의 SoC, C-rate, DoD 영향 함수,  $k$ 는 시간에 대한 노후화 파라미터이다.

### 2.2 잔존수명 추정 모델 프로파일

잔존수명에 미치는 영향 요인별 영향성은 배터리의 운영 조건에 따라 결정 된다. 각각 최대, 최소 범위 내에서 동작하지만 SoC의 경우 너무 높거나 낮으면 배터리 안정성에 영향을 주므로 평균 50%로 운전한다 [7]. 하지만, C-rate와 DoD는 시장과 고객의 특성을 반영하여 운영 시 수익의 변동성을 가져오기 때문에 각각의 운용범위 내에서 잔존수명에 미치는 영향을 파



(a) C-rate 변동



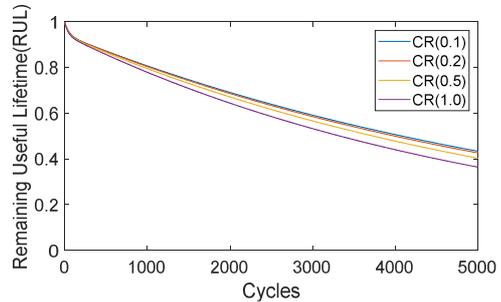
(b) DoD 변동

그림 1. SoC, C-rate 프로파일 설정(1cycle)  
Fig. 1. SoC, C-rate profile setting(1cycle)

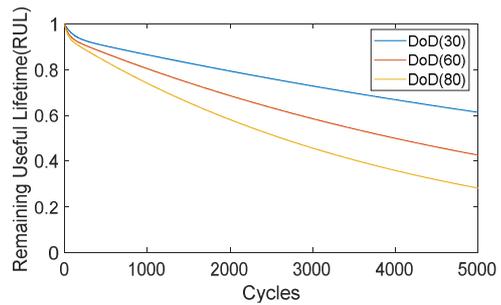
악하는 것이 필요하다. 매일 1회 사이클로 충전 및 방

전하며, C-rate와 DoD를 변경하는 조건에서 잔존수명 프로파일을 확인하기 위해 그림 1과 같이 반복 스케줄링 설정을 하였다.

수식 모델 내 C-rate는 가용 범위 내 개별 운용 조건을 설정, DoD는 동일한 운용조건(60%)으로 설정 시 결과를 그림 2(a)에 DoD를 가용범위 내 개별 운용 조건을 설정, C-rate는 동일한 운용조건(0.2)으로 설정 시 결과는 그림 2(b)와 같다. 여기서 y축 RUL(remaining useful lifetime)은 초기 용량(initial capacity) 대비 잔존 용량(nominal capacity at t)의 비 즉, 잔존수명을 나타낸다.



(a) C-rate 변동 조건, DoD 60% fixed Case



(b) DoD 변동 조건, C-rate 0.2 fixed Case

그림 2. C-rate 및 DoD 동적 프로파일 조건 잔존수명 추정  
Fig. 2. Estimation of RUL under C-rate and DoD dynamic profile conditions

## 3. 잔존수명 추정 모델 경량화

### 3.1 제안하는 경량화 방법

본 연구에서는 비선형 모델의 수식의 경량화를 위해 선형화 및 테일러급수(Taylor's series)를 적용하였다. 영향 요인 SoC, C-rate, DoD 함수는 n차 함수로 선

형화하였으며, 잔존수명을 나타내는  $E_{max}^{(n+1)}$ 는 테일러 급수 형태로 변환하였다.

3.1.1 SoC, C-rate, DoD 선형화

SoC, C-rate 및 DoD는 [7]의 운용 가능 범위를 최대, 최소로 설정하여, 각각 2, 1, 3차 함수 형태로 그림 3과 같이 선형화하였다.

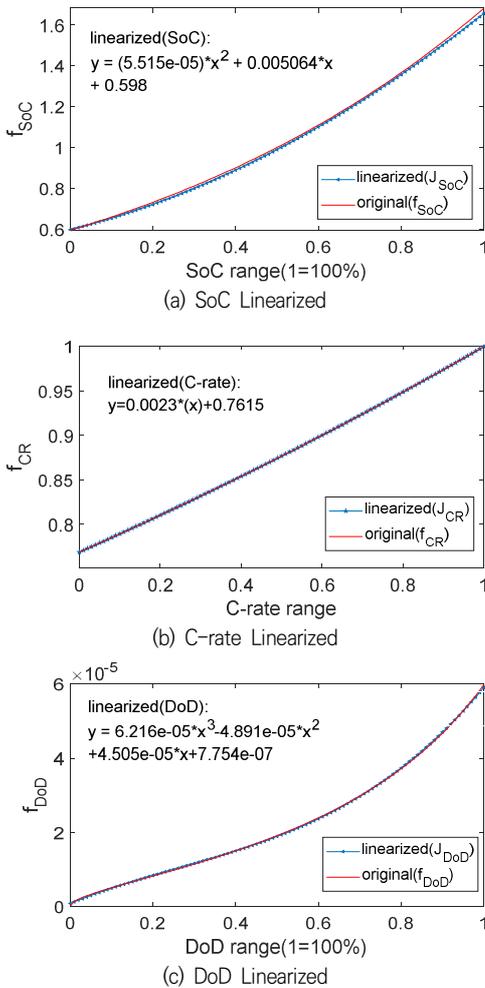


그림 3. SoC, C-rate, DoD 함수 선형화  
Fig. 3. DoD, C-rate DoD function linearized

선형화한 함수는 수식 (6)-(8)과 같이 표현하였다.

$$f_{SoC}(SoC_i) = J_{SoC}(SoC_i) \quad (6)$$

$$f_{CR}(CR_i) = J_{CR}(CR_i) \quad (7)$$

$$f_{DoD}(DoD_i) = J_{DoD}(DoD_i) \quad (8)$$

3.1.2 잔존수명 모델 경량화

앞서 선형화된 함수 형태로 변환한 결과를 바탕으로 수명저하 영향 함수  $Deg_n$ 은 수식 (9)과 같이 표현된다.

$$Deg_n = \sum_{i=1}^n f_{SoC}(SoC_i) f_{CR}(CR_i) f_{DoD}(DoD_i) + kT \quad (9)$$

$$= \sum_{i=1}^n J_{SoC}(SoC_i) J_{CR}(CR_i) J_{DoD}(DoD_i) + kT$$

식 (4)의 잔존수명  $E_{max}^{(n+1)}$ 에 사용된 지수함수( $e^x$ )는 연산의 경량화를 위하여 식 (10)의 테일러급수를 적용하였다. 식 (10)는 지수함수의 테일러급수 전개방법이며 n차 항이 무한대로 증가함에 따라 기존 수식형태와 근사 형태로 나타난다.

$$Taylor's series \quad (10)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} \dots \frac{x^n}{n!}$$

4. 사례연구 설정 및 결과

배터리를 실제로 운용할 경우 전기요금의 변동성을 고려해야하므로 불규칙하게 운용될 수 있어 잔존수명 추정이 어려워진다. 또한, 수식의 복잡성으로 인해 실제 현장과 동일한 추정에는 한계가 있다. 사례연구에서는 운용 방식이 다른 2개의 시나리오를 설계하고, 참조 모델과 경량화 모델을 사용하였을 때의 오차를 비교분석하였다.

잔존수명 추정 결과와 제안된 경량화에 사용된 수식은 Atmega328 프로세서 환경에서 성능 검증을 실시하였다. 연산 성능을 테스트를 통해 경량화를 통한 프로세스의 연산 속도 개선 결과를 비교하였다.

4.1 사례연구 설정

2장의 식(1)-(3)에 따르면 운용 중 SoC, C-rate, DoD 영향은 지수 형태로 나타나며, 식(4)의  $E_{max}^{(n+1)}$ 는 해당 영향이 거듭 지수로 곱해져 복잡한 형태로 계산된다.

실제 배터리 운영 변동성을 반영한 분석 결과 도출을 위해 그림 4와 같이 운영 시나리오를 적용하여 배터리 잔존수명 선형화 성능을 테스트하였다. 여기서, S tatus는 배터리 운영 상태이며, 1: 충전, -1: 방전, 0: 동작 정지를 나타낸다.

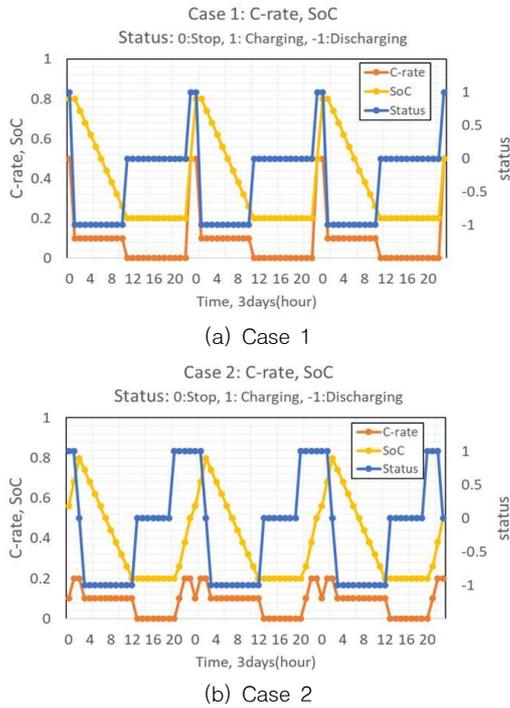
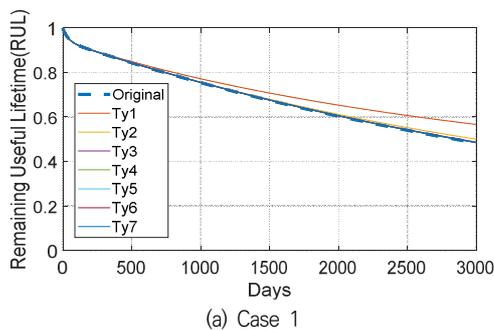


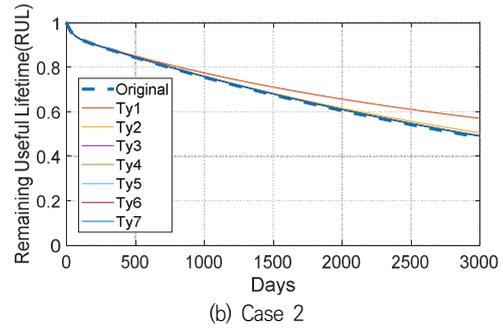
그림 4. 배터리 운영 사례연구 시나리오  
Fig. 4. Battery operation scenario for case studies

### 4.2 사례연구 결과

사례연구에서는 Case1, 2의 시나리오로 운영할 경우 제안된 잔존수명 추정 모델과 기존 모델의 결과 및 오차를 그림 5, 6과 같이 비교하였다. 식 (4)의 지수함수를 테일러급수 1-7차 까지 확장하며 시간에 따른 수명감소를 모델링하였다.



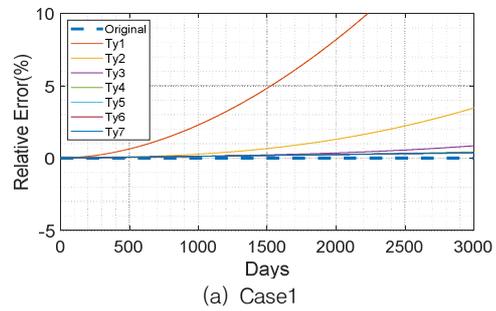
(a) Case 1



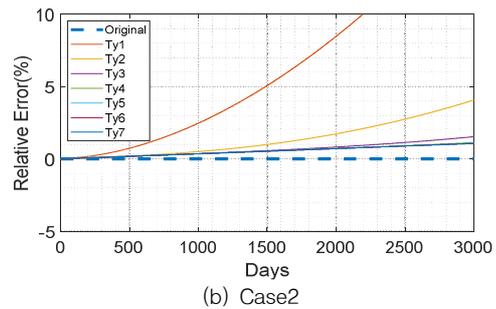
(b) Case 2

그림 5. 기존 vs. 경량화 모델 간 추정 비교

Fig. 5. Original vs. Lightweight model estimation comparison



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 6. Original 모델에 대한 경량화 모델의 상대오차 비교

Fig. 6. Relative error comparison of lightweight model to original model

표 1은 운영기간 및 테일러급수 차수에 따른 상대오차 결과가 연차 증가에 따라서 감소함을 보였다. 잔존수명 60% 지점을 수명 종료 지점으로 가정하였을 경우, Case 1에서 지수함수 형태의 잔존수명 함수에 Taylor 1차수 선형화 시 수명 종료 지점인 6년 차에서 오차는 약 9.67%로 나타났으며, Taylor 급수 5차수 이

표 1. 운영기간별, 지수함수 형태의 잔존수명 함수의 Taylor 급수 차수별 적용에 따른 상대오차  
 Table 1. Relative error comparison for operation period and nth degree Taylor series

Case	운영기간 Year/Day	지수함수 형태의 잔존수명 함수의 Taylor 급수 차수별 적용에 따른 상대오차(%)							잔존수명
		1	2	3	4	5	6	7	
1	1/365	0.36	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.869
	2/730	1.28	0.15	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.801
	3/1095	2.71	0.33	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13	0.738
	4/1460	4.60	0.62	0.21	0.18	0.18	0.18	0.18	0.681
	5/1825	6.93	1.05	0.31	0.23	0.22	0.22	0.22	0.628
	6/2190	9.67	1.62	0.43	0.28	0.27	0.27	0.27	0.579
2	1/365	0.43	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.869
	2/730	1.42	0.32	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.802
	3/1095	2.90	0.58	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.739
	4/1460	4.84	0.95	0.55	0.52	0.52	0.52	0.52	0.682
	5/1825	7.19	1.44	0.73	0.66	0.65	0.65	0.65	0.629
	6/2190	9.96	2.08	0.93	0.80	0.78	0.78	0.78	0.580

상 적용 시 잔존 수명 모델 간 오차가 0.27%로 나타났다. Case 2에서는 C-rate, 충·방전 주기 등 운용 변동성의 차이가 있으며 지수함수 형태의 잔존수명 함수에 Taylor 급수 5차수 이상 적용 시 0.78%로 나타났다.

기존 배터리의 잔존수명 평가에 사용되는 수식 모델과 제안한 경량화 모델 간 연산 복잡도를 평가하기 위해 Arduino의 MCU ATmega328과 수식 내 포함된 연산에 소요되는 시간(us)을 계산하였다. 표 2는 기존 추정 모델과 제안하는 잔존수명 경량화 모델 간 연산 성능을 비교한 결과이다. 여기서 테일러급수를 사용한 지수함수 형태의 잔존수명 함수에 1차수, 7차수 선형화를 적용한 경우 표 2와 같이 각각 78.3%, 76.8% 연산시간이 단축되어 연산성능이 크게 개선되는 것으로 나타났다.

표 2. 테일러급수 차수별 연산 속도 결과  
 Table 2. Result of Taylor series calculation speed

Model		Speed [us]
Taylor 차수	ref[7]	551.2
	1	119.8
	2	120.9
	3	121.8
	4	122.9
	5	124.2
	6	125.9
	7	127.7

연산 조건 중 멱함수, 지수함수 조건의 연산은 일반 사칙연산 및 조건문 대비 약 20배 연산속도 차이를 보인다. 그 결과에 따라 연산성능이 큰 폭으로 증가하였으며, 기존 모델 대비 프로세서 복잡도를 완화하여 경량화 결과가 도출되었다.

### 5. 결론

본 논문은 ESS 중 배터리 운영 시 직접 추정을 요구하는 현안과 잔존수명 추정하기 위해 개발된 기존 수식 모델의 연산성능을 개선을 위한 선형화 연구를 수행하였다. 잔존수명을 계산하는 모델은 고도로 비선형적인 형태의 수식의 조합 형태로 구성되어 있어 경량화가 필요하다. 제안된 잔존수명 추정 모델의 이용 시 기존 수식 모델 대비 연산시간은 약 76.8-78.3% 단축되었으며, 수명종료(6년차) 지점에서 오차는 1% 이내로 나타났다.

기존의 비선형 형태의 잔존수명 추정 모델과 같은 고차 함수 연산 시간 보다 적은 컴퓨팅 성능이 요구되므로 경제적인 배터리 잔존수명 연산 등에 기여할 수 있음을 보였다. 또한, 제시한 경량화 모델은 배터리가 연계된 다양한 분산자원 환경에서 잔존용량 감소분과 경제성을 고려할 시 최적 운영에도 활용이 가능할 것이다.

## REFERENCES

- [1] Seak Bai Koh and Sung-Yong Son, "A Review of Transaction-Based Energy Management Technology for Energy Prosumers," The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, Vol. 11, No.1, pp.45-53, Feb, 2018.
- [2] B. Pinnangudi, M. Kuykendal, and S. Bhadrana, "4 - Smart Grid Energy Storage," The Power Grid, pp.93-135, 2017.
- [3] SNE research center, "Global ESS Market Forecast (2017~2030)," SNE research, pp 81, May, 2019.
- [4] S.H. Sim, J.H. Gang, Dawn An, S.I. Kim, Jin. Y. Kim and J.H. Choi, "Remaining Useful Life Prediction of Li-Ion Battery Based on Charge Voltage Characteristics," Trans. Korean Soc. Mech, Vol.37, No.4, pp.313~322, January, 2013.
- [5] W.R. Kim and Y.S. Kim, "A Study on RFID Code Structure for Traceability System of Electric Vehicle Batteries," KITS, pp.95-104, February, 2012.
- [6] Anthony Barré, Benjamin Deguilhem, Sébastien Grolleau, Mathias Gérard, Frédéric Suard and Delphine Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," Journal of Power Sources Volume 241, pp.680-689, November, 2013.
- [7] Brandon Foggo, Nanpeng Yu, "Improved Battery Storage Valuation Through Degradation Reduction," IEEE Transactions on SmartGrid Vol.9, Issue 6, pp.5721-5732, November, 2018.
- [8] X. Han, M. Ouyang, L. Lu and J. Li, "A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation," Journal of Power Sources Volume 268, pp.658-669, December, 2014.
- [9] D. Zhang, S. Dey and HE. Perez, "Remaining Useful Life Estimation of Lithium-Ion Batteries based on Thermal Dynamics," 2017 American Control Conference(ACC), pp.24-26, May, 2017.

## 저자약력

### 유 정 운(Jung-Un Yu)

[개인회원]



- 2016년 8월 : 가천대학교 에너지IT학과(학사)
- 2020년 2월 : 가천대학교 전기공학과(석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 전기공학과(박사과정)

스마트그리드, 태양광발전, ESS, 전력 데이터 분석

### 박 성 원(Sung-Won Park)

[개인회원]



- 2018년 가천대학교 전기공학과 박사
- 2018년 ~2020년 가천대학교 연구교수
- 2018년 7월 ~ 2019년 9월, University of Bath(영국), Visiting Researcher
- 2020년 ~ 현재 영산대학교 전기전자공학과 조교수

스마트그리드, VPP, 차세대 배전계통 운영(DSO, DMO)

### 손 성 용(Sung-Yong Son)

[중심회원]



- 1990년 KAIST 학사
- 1992년 KAIST 석사
- 2000년 Univ. of Michigan, ANN Arbor 박사
- 2006년 ~ 현재 : 가천대학교 전기공학과 교수

스마트그리드, 스마트홈, 스마트시티