



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학전문석사학위 연구보고서

2차 전지 수명예측방법에 대한 고찰

A study on life estimation system for a
Secondary Battery

2018년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과

이 창 호 (성명)

2차 전지 수명예측방법에 대한 고찰

A study on life estimation system for a
Secondary Battery

지도교수 윤 용 태

이 리포트를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함
2018년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과
이 창 호 (성명)

이창호의 공학전문석사 연구보고서를 인준함
2018년 2월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

2차 전지는 생산하는 메이커에 따라 전지를 구성하는 음극재, 양극재 및 분리막의 구성 성분이 달라지게 되며 양극 활물질, 음극재질, 분리막 등의 구성 재질에 따라 그 수명(Cycle)이 다르게 된다. 현재까지의 수명예측 방법은 전지의 종류나 구성 재질에 관계없이 전지의 열화도, 전지의 전압 변화, 전지의 내부 저항변화 측정값을 적산하거나 기록하는 방법 등으로 전지의 기대수명을 예상하는 방법을 사용하여 왔으나 가장 중요한 전지의 구성재질에 따른 수명예측은 고려되고 있지 않아 예측되는 전지의 기대 수명치는 일정한 사용 기간이 경과되어야 하고 전지 사용 중 특정 조건이 만족되어야 하는 등의 문제가 있다. 또한, 충방전 전류의 적산치 및 충전 방전 전압의 변화를 추적함으로써 정확한 측정치가 항상 수반되어야 하므로 시스템에서 전류치, 전압치, 온도 등 외부 요건을 정확히 측정할 수 있는 외부 제어장치가 필수적으로 구비 되어야 하고 그 제어장치의 정확도에 따라 전체 시스템의 기대수명치의 정확도가 좌우된다고 할 수 있다. 더불어, 충방전 조건에서 전지의 수명이 다할 때까지 만충전, 만방전이 한번도 이루어지지 않는 경우 등 일어날 수 있는 여러가지 충방전 조건에 모두 대응할 수 없어 정확한 수명을 예측하기는 어려운 점이 있다. 2차 전지는 전지내부의 양극재, 음극재, 전해질, 분리막 등 전지 구성요소의 근소한 차이에 의해서도 전지의 용량 및 기대수명(Cycle)에 차이가 있을 수 있다. 따라서 한개의 시스템에 구성되

는 복수의 직병렬로 연결된 개별 전지들은 전지의 특성상 모두 같은 기대수명을 가지기는 어려운 점이 있다. 만약 시스템에 구성되어 있는 각각의 전지들의 개별 기대수명을 정확히 예측하여 표시하여 줄 수 있다면 전체 시스템의 SOH (System Of Health)를 유지하면서 문제가 되는 전지만 미리 교체 할 수 있게 된다. 이러한 개별 기대수명 예측 방법으로는 시스템에 구성된 개별 전지의 기대수명을 예측하여 시스템 본체에 제공하는 방법으로 가능하다.

본 연구 보고서는 각 전지 제조업체에서 제공하는 전지의 DOD(Discharge of Depth) 별 Cycle 데이터를 근거로 기존의 일반적인 수명 예측장치의 예측 정확도를 개선하여 전지 제조업체별 전지의 상세한 수명 예측을 가능하게 하는 방법과 전지의 개별 수명 예측을 해야 하는지에 대한 필요성을 설명하고 있다.

주요어 : 기대수명, SOH (System Of Health), DOD별 CYCLE 데이터
학 번 : 2016-22214

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경 및 목적	1
제 2 절 보고서의 구성 및 개요	4
제 2 장 2차 전지의 수명 예측방법	4
제 1 절 2차 전지 운영	4
1. 신재생에너지용 2차 전지	6
2. 비상전원장치(UPS)용 2차 전지	7
제 2 절 수명 예측 알고리즘	9
1. 기존의 2차전지 수명예측방법	10
2. 전지별 DOD별 Cycle 개요	9
3. 함수 도출 및 알고리즘 전개	10
제 3 장 실 증	18
제 1 절 발전설비 적용(비상전원 공급장치)	18
제 2 절 데이터 분석	22
제 4 장 결 론	27
참고문헌	28
Abstract	29

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

가정과 공장에서 사용되는 전력을 생산하는 발전소는 안정적 설비운동을 위해 필수전원을 공급하고 있는 비상전원공급장치를 구비하고 있다. 비상전원공급장치의 구성은 배터리, Inverter, Converter 등으로 구성되어 있으며 이중 배터리는 충전과 방전을 지속하며 비상시 전원을 공급할 수 있는 2차 전지로 구성되어 있다. 이러한 전지들을 구성하는 2차 전지들은 한개의 시스템 구성시 적게는 수십개에서 수백개에 이를 정도로 많은 전지들이 직병렬로 조합되어 사용되고 있다.

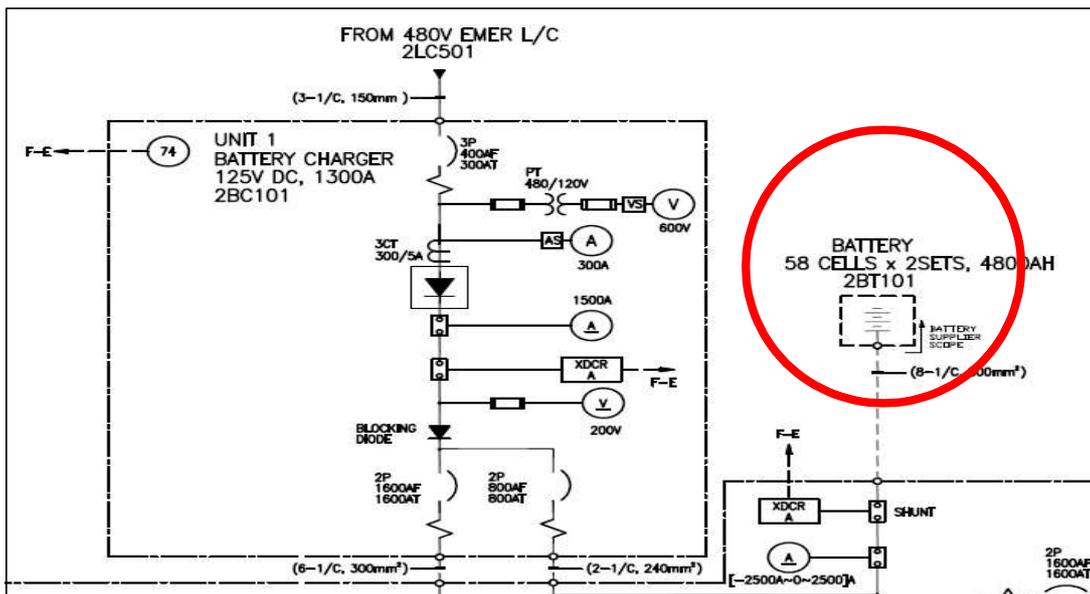


그림 1. 평택2복합 비상전원공급장치 중 2차 전지 연결

구 분	GT #1	GT #2
형 식	무보수 연속전지	
설치수량	58ea×2set	58ea×2set
10시간을 정격	4800[AH]	4000[AH]
부동충전전압	2.23	

표 1. 평택 2복합 비상전원장치 2차전지 재원

이러한 전지들은 대부분 연속전지나 리튬이온 전지로 구성되어 있으며 최근에는 보수형 연속전지에서 무보수형 연속전지 또는 리튬이온 전지로 바뀌어 가고 있는 추세이다.

발전소에서 설치되어 있는 2차전지의 성능에 문제가 있을 경우 자칫 대형설비고장으로 확대될 수 있기에 2차전지의 최적운동을 위한 유지보수에 많은 관심을 기울여야 한다.

만일, 직병렬로 연결된 2차전지 그룹의 특정셀에 고장이 생길 경우 비상전원공급시 필요 정격용량의 전압이 공급되지 않아 발전설비의 운영이 불안정해진다.

따라서, 2차전지의 정확한 수명을 예측하고 적기에 전지를 교체함으로써 불필요한 비용을 방지하고 안정적 설비 운영이 가능토록 해야 한다.

일반적으로 2차전지의 기대수명은 SOH (System Of Health)로 추정하거나 전지의 충방전 Cycle 을 추정하는 방법으로 수명을 예측하고 있다.

그중에는 전지의 열화도에 따른 총용량 변화를 Fuzzy 값으로 산출하여 그 변화량으로 전력량 값을 추정하는 방법, 리튬이온 전지의 정전압, 정전류 충전특성을 이용하여 특정 충전시점 - 정전류에서 정전압으로 바뀌는 시점 - 등을 파악하여 전지의 충전 용량을 추정하는 방법, 내부

전압을 산출하고 이를 이용한 최대 출력을 산출하여 변화량을 측정하여 배터리 열화 상태의 경고 및 결함 신호로 추정하는 방법, 배터리의 충방전 전류를 고려하여 추정 OCV(Open Circuit Voltage) 를 연산하고 배터리의 총 전류의 적산값을 가감하여 SOC 를 산출하고 보정값에 도달시 추정 OCV 전압을 기준 SOC 값 테이블을 보정하는 방법으로 SOC 를 추정하는 방법 등이 일반적으로 사용되고 있다.

그러나, 이러한 방법으로는 초기 특성이 상이한 여러가지 2차 전지의 경우에는 필요한 데이터를 습득하기까지 많은 데이터 축적 기간이 필요하고, 상당히 복잡한 연산이 필요하여 일반적인 소용량 마이크로 컨트롤러로 구현하기 어렵고 데이터를 축적하기 위해서는 해당 전력저장장치의 충방전이 계속 진행되어야 하며 데이터가 계속 모니터링 되지 않으면 예상수명을 정확한 값으로 예측할 수 없었다.

신재생 에너지 사용 증가로 인한 전력저장용 리튬이온 2차전지의 수요는 해마다 늘어 한 장소에서 수KW에서 수십MW 단위의 전력 저장장치가 사용 되고 있다. 이때 사용되는 2차전지의 수는 최소 수백개에서 수십만개의 개별전지가 직병렬로 연결되어 사용되고 있고 이러한 개별 운용되는 전지중 한 개에 문제가 발생할 경우를 체크하고 또한 이것을 선별하여 수리하는 문제 또한 어려운 일로 부각되었다.

여기에 더하여 계속 충방전 되는 신재생 에너지용 전력 저장장치는 전지의 개별 수명이 화학전지의 특성상 균일하지 않고 전지의 수명이 다르게 나타날 수 있다. 이러한 개별전지의 예상 수명을 예측하여 전력저장 장

치를 유지 관리하는 일 또한 어려운 일이었다.

더구나, 비상전원장치(UPS)용 전지는 사용 환경상 일상적인 충방전이 이루어지지 않고 비상시 한번 사용되는 전력을 저장하는 것이 그 주된 목적이기에 평상시 충방전이 이루어지지 않아 기존의 리튬이온 전지로 전원장치 구성시 상기의 충방전이 상시적으로 일어나지 않아 충방전을 모니터링하는 방식으로는 그 수명을 예측하고 시스템을 유지보수 하기는 어려운 일이었다.

본 연구에서는 종래의 이러한 문제점을 해결하기 위해, 기존 신재생 에너지용 2차전지의 충방전 상태를 모니터링하여 수명을 예측하는 종래의 방식에 더하여 비상전원장치용 전력저장 장치에도 적용하여 사용할 수 있도록 2차전지 제조 회사에서 자체 실험하여 배포하는 DOD 별 Cycle [그림 2] 을 참조하여 전지의 DOD 별 Cycle 데이터를 기본으로 하는 함수를 도출하는 방법으로 전지의 예상수명을 산출하였다.

이러한 방법의 당위성을 입증하기 위하여 실제 비상전원장치에 적용하여 검증하였으며 기존 설치된 리튬이온 전력저장장치 비상전원장치의 10년간의 데이터를 적용하여 예상수명을 예측하는 방법으로 검증 하였다.

제 2 절 보고서의 구성 및 개요

본 논문에서는 리튬이온 전지를 이용한 2차전지의 예상수명을 예측하는 방법을 일상적으로 충방전 되는 신재생 에너지용 전력 저장장치에 더하여 비상전원장치에도 적용할 수 있는 신뢰성 있는 방법을 제안하였다.

제 1장에서는 본 보고서의 연구 배경 및 목적 그리고 보고서의 구성과 개요에 대해 살펴보았다.

제 2장에서는 충방전이 일상적으로 이루어지는 신재생 에너지용 2차전지는 물론 일상적으로 충방전이 이루어지지 않고 비상시에만 방전하는 비상전원장치용 2차전지에도 적용 가능한 수명 예측방법(알고리즘)을 살펴보았다.

제 3장에서는 서인천발전본부에서 10년간 비상전원장치 2차전지로서 운용해 온 리튬이온 전지를 대상으로 데이터를 분석하고 수명예측알고리즘을 통해 비교 검증하였다.

제 4장에서는 3장에서 분석한 데이터를 통해 수명예측알고리즘을 통한 2차전지 교체시기와 실제 배터리의 교체시기를 확인하고 알고리즘의 정확성을 입증하였다.

제 2 장 2차 전지의 수명예측방법

제 1 절 2차 전지의 운영

국내외에서 신재생 에너지 및 무정전 전원장치(UPS)용으로 사용되는 2차 전지는 대부분 연축전지가 주류를 이루어 왔으나 리튬 이온전지가 고성능, 대용량화 되면서 근래 수년간 연축전지에서 리튬 이온전지로 그 시장이 급속히 확대되고 있다. 특히 신재생 에너지용 전력저장 장치의 경우 더 이상 연축전지는 사용되지 않는 추세이고 리튬이온 전지는 신재생 전력 저장장치에서 이동용(전기 자동차)등으로 그 시장이 급속히 확대되어 가고 있다. 그러나 리튬 이온전지의 개별전지 용량은 수 암페어에서 수백 암페어에 불과하여 전력 저장장치로 쓰려면 연축전지보다 많은 수의 전지가 직병렬로 조합되어야 하는 단점이 있다. 또한, 연축전지보다 상대적으로 높은 안전장치가 필수적으로 구비되어야 하며, 그 운영 측면에서도 많은 수의 전지를 개별로 관리하는 BMS(Battery Management System)가 필수적이다. 많은 수의 전지가 직병렬로 연결되므로 상대적으로 병렬로 연결된 시스템은 같은 용량의 연축전지와 비교 하였을 때 만약 한 개의 개별전지가 불량으로 그 성능을 잃었을 때 전체 전력장치에서 그 해당되는 병렬 장치중 하나만 오프(off)되고 나머지 전력장치는 정상 작동됨으로써, 수천암페어 용량의 연축전지가 하나의 직렬연결 계통을 이루었을 때 보다 수십, 수백 암페어의 리튬전지가

병렬로 연결 되었을 때 더 시스템이 안정적으로 동작 한다는 장점도 있다. 따라서, 연축전지보다 사용 수명이 길다는 장점 외에도 리튬이온 전지 시스템이 더 안정적이라는 부분도 있다. 그러나, 연축전지 보다 많은 수의 전지를 관리하고 운영하는 측면에 있어서는 연축전지를 사용하는 시스템보다는 복잡하고 운영이 어렵다는 것은 피할 수 없는 문제인 것은 분명한 사실이다.

1. 신재생 에너지용 전력 저장장치 현황

태양광, 풍력등 신재생 에너지 전력 저장용으로 사용되는 전지는 초기에는 연축전지 니카드 전지, 니켈수소 전지등 여러 가지의 2차전지가 실험 되었으나 현재 한전 FR용, ESS용 등으로 리튬전지가 채택되어 수백 MW 단위로 설치되고 있으며 신재생 에너지 확대라는 정부 정책에 힘입어 전력저장장치가 결합된 태양광, 풍력 장치 등의 REC가 5.0으로 상향 조정되는 등 리튬이온 전지의 시장이 점차 커지고 현재는 기존의 연축전지등을 사용하는 신재생에너지 전력저장 장치는 찾아보기 어려운 실정이다. Cycle 수명이 수천회에 육박하는 리튬전지의 경우 매일 1회정도의 충방전시 10여년의 수명을 보증하고, REC 5.0등이 적용됨을 감안할 때 연축전지보다 그 가격이 월등히 비싸다는 단점이 상쇄되어 국내에서의 신재생 에너지용 저장장치로서 주로 사용되고 있다. 다만 많은 수의 전지가 직병렬로 조합되어 사용되어지고 있어 BMS 시스템의 중요성이 부각되고 있고 운영측면에 있어서도 많은 수의 전지가 관리되어야 하는 부분이 있어 전지 자체를 관리하는 부분, 전지 자체의 개별 수명을 예측하

여 예방정비 할 수 있는 부분 등의 기술적 필요성이 그 어느 때보다 부각되고 있다.

2. 비상전원 공급장치(UPS)용 2차 전지 현황

신재생 에너지용 2차 전지와 다르게 비상전원 장치용 2차 전지는 더딘 시장 성장세를 가져가고 있다. 그 이유는 기존의 연속전지 대비 리튬전지의 가격이 상대적으로 높고 그 차액을 보전하여 주는 제도의 부재 및 비상시에 한번 사용한다는 시스템의 성격상 연속전지와 가격 차이를 좁힐 수 없는 단점이 있었다. 일반적으로 소용량 UPS의 경우 (PC용 수KW급) 연속전지와 가격 차이는 작게는 수배에서 수십배에 이르는 등 큰 가격 차이로 인해 현재 시장에서 작은 용량의 PC용 UPS의 경우 리튬전지를 사용하는 경우는 극히 드문 상황이다. 그러나 리튬전지의 병렬연결 안정성 및 높은 충방전율(C-Rate)에 따른 장점을 파고들어 한전 발전 자회사의 발전기용 비상용 전원공급장치에 리튬전지가 10년전부터 공급되어 사용되고 있고 연속전지보다 높지 않은 가격을 실현함으로써 고신뢰성을 요구하는 시장에 점차 사용되고 있는 추세이다.

그러나, 발전사의 특성상 기존에 설치된 비상용 전력 저장장치는 설치 후 충방전이 실제 1년에 한번 용량 테스트할 때 이외에는 충방전 하는 경우가 없어 실제 전력 저장장치의 수명이 얼마나 남았는지 각 설치된 수만개의 전지 각각의 수명이 얼마나 남았는지 파악하기 어려워 예방정비등이 어려운 단점이 있기에 이에 대한 보완이 시급한 상황이다. 본 논

문은 이러한 비상용 전원장치용 전력저장장치의 문제점을 파악하여 이에 대한 수명예측 방법도 또한 제시하고 있다.

제 2 절 수명 예측 알고리즘

리튬 이온전지를 사용한 전력 저장장치에 수명 예측이 필요한 이유는 전지의 특성상 수십, 수백개의 전지가 개별로 수명이 다르고(화학전지의 특성상) 또한 직·병렬로 많은 수의 전지가 연결되고 있어 중요한 시설을 보완하는 비상용 전력 저장장치에 사용할 때와 매일 충방전이 일어나는 신재생 에너지용 전력저장 장치에 사용할 경우 시스템의 안정성 확보를 위하여 예방정비가 꼭 필요하게 된다. 또한 무인 운전등의 경우에도 원격지에 있는 관리자가 다수의 전력 저장 시스템을 관리할 수 있도록 예방정비 할 수 있는 시스템을 구현하는 것이 필요하며 이때는 필수적으로 각 개별 전지의 예상 수명 등 꼭 필요한 정보를 관리자에게 송신하는 시스템 구현이 꼭 필요하다고 할 수 있다.

1. 기존의 2차 전지 수명예측 사례

2차전지의 정확한 수명예측방법에 대한 연구는 전력계통 또는 안정적인 설비운동을 위해 예전부터 이루어져 왔으며, 현재에도 지속적으로 진행 중이다. 본 장에서는 현재까지 이루어져 왔던 2차전지의 수명예측방법에 대한 사례를 살펴보고자 한다.

- 1) 충전전압 특성을 이용한 리튬이온 배터리(이후 2차전지)의 잔존수

명 예측(한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 심성흠 외 5명)

사용중인 배터리에 대해 충전곡선 기울기를 이용한 2차전지의 용량을 평가하고 잔존수명을 예측하는 방법으로 2차전지는 충방전을 거듭하면서 용량이 점차 저하되고 보통 초기 대비 80% 이하로 용량이 떨어지게 되면 수명이 다한 것으로 판단한다. 2차전지의 상태에 대한 인자는 SOH(State of Health) 또는 SOL(State of Life) 로 표시되며 용량을 대변하는 특성치로 충전곡선의 기울기를 이용하는 방법을 제시하여 SOH를 데이터를 산출하고 이를 바탕으로 SOL 수명예측을 수행하였다.

2) 2차 전지 잔량측정방법 및 그 장치((주) 에스티비)

본 발명은 2차 전지의 사용가능 전력량을 산출하는 방법 및 그 장치에 관한 것으로 전지의 사이클 카운트에 기초하여 2차 전지의 잔량을 측정한다. 전지의 사이클 카운트는 2차 전지의 충방전 전류치를 측정하는 단계, 전지의 사이클별 전력량 감소치의 오차를 측정하는 단계, 사이클 카운트별 평균온도 보정계수 산출단계, 전지 사이클별 전력량 감소치의 오차, 충전전압 변화에 따른 충전전류 변화치의 오차 및 사이클 카운트별 평균온도 보정계수를 다층형 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용하여 학습시킴으로써 2차 전지의 사이클을 카운트하는 단계로 2차 전지 잔량을 측정하였다.

3) 이차전지의 상태 감시 및 수명 예측 알고리즘 개발(한국기술교육대 전기전자통신공학부 박재범 외 3인)

2차 전지의 SOC(State of Charge) 를 평가하기 위해서는 전지 케이스 내부의 전해액 온도에 따라 달라지는 비중값을 측정해야 하나 대부분의 2차 전지는 밀폐형으로 보급되고 있어 전해액의 상태를 파악하기 어려운 실정임. 이에 출력전압과 출력전류 및 연속전지 케이스와 상온온도를 측정하여 열전달식과 비중식을 유도함으로 정확한 SOC 평가 알고리즘을 제시하고 20℃로 환산된 비중 값에 대하여 전지의 충방전에 대한 비중누적 값을 계산함으로 충방전 사이클을 판정

그러나, 이와 같은 종래의 2차전지의 수명 예측 방법은, 가장 중요한 전지의 구성 재질에 따른 수명 예측은 고려되고 있지 않고 예측할 수 있는 전지의 기대수명치는 사용 기간이 일정시간 경과하는 것을 기다려야 하며 전지 사용 중 특정 조건이 만족되는 것을 확인해야 한다.

또한, 충방전 전류의 적산치 및 충전 방전 전압의 변화를 추적함으로써 정확한 측정치가 항상 수반되어야 하므로 시스템에서 전류치 전압치 온도 등 외부 요건을 정확히 측정할 수 있는 외부 제어장치가 필수적으로 구비 되어야 할 뿐만 아니라 외부 제어장치의 정확도에 따라 기대수명치의 정확도가 좌우되는 문제점이 있다.

더불어, 충방전 조건에서 전지의 수명이 다할 때까지 만충전 만방전이 한번도 이루어지지 않는 경우 등과 같이 발생가능한 여러가지 충방전 조건에 모두 대응할 수 없어 정확한 수명을 예측하기가 어려운 문제점이 있다.

또한, 종래의 2차전지의 수명 예측 방법은, 2차전지가 금형제품과 같

이 똑같은 틀에서 찍어 나오는 제품이 아니라서 내부에 양극재, 음극재, 전해질, 분리막 등 전지 구성요소의 근소한 차이에 의해서도 전지의 용량 및 기대수명(CYCLE)에 차이가 발생하는 문제점이 있다.

이에, 전지의 제작사에서 제공하는 DOD 별 Cycle 데이터를 근거하여 상기에 나열한 문제점을 보완할 수 있는 알고리즘을 작성하였다.

2. 전지별 DOD별 Cycle 개요

2차 전지는 제조업체별 생산되는 제품의 특성이 다르며 그 용량 또한 다른 제품을 생산하여 공급한다. 그러나, 업체에서 공급되는 전지의 스펙에는 필수적으로 생산되는 전지의 DOD(Discharge of Depth)별 Cycle(그림 2)를 포함하여 사용자에게 공급하게 되는데 이러한 데이터는 실제 업체에서 생산하는 전지의 종류에 따라 실제 실험한 근사치를 표현하게 된다.



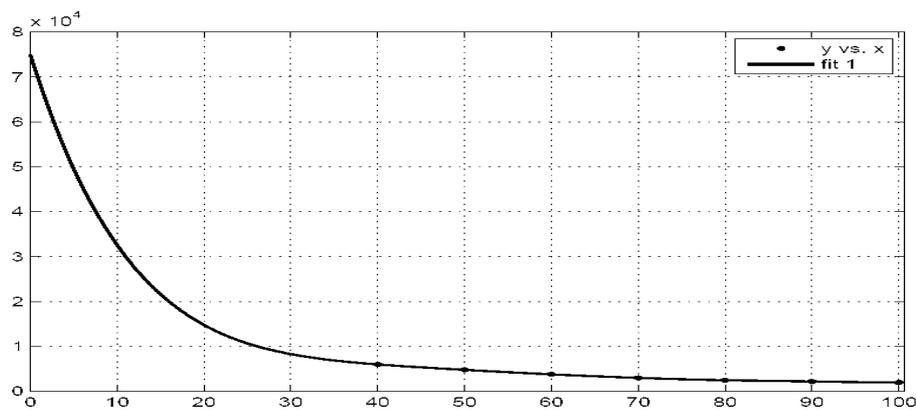
[그림 2] DOD 별 Cycle (리튬 이온전지)

이러한 데이터는 제조업체에 따라 다르며 일반적인 생산데이터를 기준으로 하여 전반적으로 해당 전지의 사용수명 예측을 가능하게 한다. 다만 이는 만충전 및 만방전이 일어나는 경우를 가정하고 실험한 데이터를 주었을 뿐이고 실제 사용자가 사용하는 전지의 모든 경우의 수를 가정한 것은 아니다. 그러나 이러한 데이터는 실제 사용되는 전지의 수명 예측에 중요한 부분이다.

2. 함수 도출 및 알고리즘 전개

전지의 DOD 별 Cycle 데이터를 기본으로 하는 기본 함수를 Matlab Curve Fitting Tool을 이용하여 [식 1]을 도출하여 그래프로 나타내면 [그림 3] 과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

이때의 상수 p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7은 실제 그래프에 적용하여 데이터를 재작성 하고 그려가면서 얻을 수 있다.



[그림 3] 다항식으로 표현된 그래프

$$[식 1] f(x) = p1 \times x^6 + p2 \times x^5 + p3 \times x^4 + p4 \times x^3 + p5 \times x^2 + p6 \times x + p7$$

예로서 다항식 함수를 사용하여 계산 하였으나 [그림 2] 에서 보여주는 그래프의 기울어짐 등을 고려하고 계산 편의에 따라 여러가지 함수를 사용하여 계산 할 수도 있을 것이다.

[그림 2] 는 100% DOD 충방전시 2000 Cycle 의 기대 수명을 갖고 40% DOD 충방전시 약 6000 Cycle 정도의 기대 수명을 갖는다는 것을 실험으로 확보한 데이터로 표현하고 있다.

이러한 데이터를 기준으로 [식 1] 에 대입하여 [그림 3] 의 그래프를 얻을 수 있다.

[그림 3] 에서 X 축 그래프는 [그림 2]에서 보여준 40% DOD 보다 적은 부분에서의 Y축 Cycle 예상을 보여 주고 있으며 [그림 2]에서의 그래프와 1:1 비교시에도 그래프의 기울어짐 궤적은 정확히 일치함을 보여주고 있어 40% 이하의 충방전 상태의 예상 수명 기대치를 추정할 수 있다.

[그림 2] 에서 100% DOD 충방전시 2000 Cycle 의 수명을 갖는다는 의미를 100% DOD, 즉 1C-Rate (예: 100Ah 전지를 100A로 방전할때 1C-Rate) 충방전 한다는 의미로 바꾸어 생각할 수 있다.

[그림 2] 는 DOD 별 Cycle 특성표 에서 C-Rate 별 Cycle 특성표로 치환하여 바꾸어 생각한다면 1 Cycle 은 [식 2] 와 같은 의미로 바꾸어 생각할 수 있다.

$$[식 2] \quad 1CYCLE = \frac{1C-RATE \times \text{전체충전시간}}{(2000CYCLE \text{최대기대수명잔존치} - \text{저장된수명} CYCLE)}$$

[식 2] 는 1 C-Rate로 만충전 까지의 시간을 1 C-Rate시의 최대 기대수명 값으로 나눈 것이다. 이때, 2000 Cycle 이라는 최대 기대 수명값은 충방전이 진행되어 Cycle 값이 하나씩 증가할 때마다 반대로 하나씩 감소하게 된다.

충전시간은 2차전지의 특성 및 제조 회사의 제조 특성에 따라 수십분에서 수십시간 정도의 차이를 가지므로 2차 전지회사에서 제공하는 만충전까지의 시간을 참조하여 결정하며 이때 [식 2] 에서의 전체 충전시간의 단위는 수초에서 수시간까지 임의로 정하여 계산 할 수 있다.

예를 들어 1 C-Rate 를 [식 1]의 X 값으로 삽입하면 $f(x)$ 결과값은 2000 이 도출된다.

[식 2]에서의 충전시간 단위를 1 분(Min) 이라고 하고 1 분간의 평균 충전전류가 1 C-Rate 였다면 [식 2]에서의 결과값은 1 Cycle 의 1 분간의 Cycle 기여도로 볼 수 있다.

1 분간의 Cycle 기여도를 적산하고 [식 2] 의 1 Cycle 값보다 크게 되는 수치가 되었을 때 1 Cycle 증가하여 [식 2] 의 저장된 수명 Cycle 에 이 값을 합산하고 이것을 불휘발성 메모리에 저장한다. 저장된 수명 Cycle 은 만충전이 진행되었을 때 1 씩 증가하고 그 값은 비휘발성 메모리 등에 저장되어 사용되는 값이다.

저장된 수명 Cycle 값이 0 이라고 한다면 [식 2]에 대입한 결과는 1분간 1 C-Rate 로 충전시 1 Cycle 값의 1분간의 기여치라고 할 수 있다.

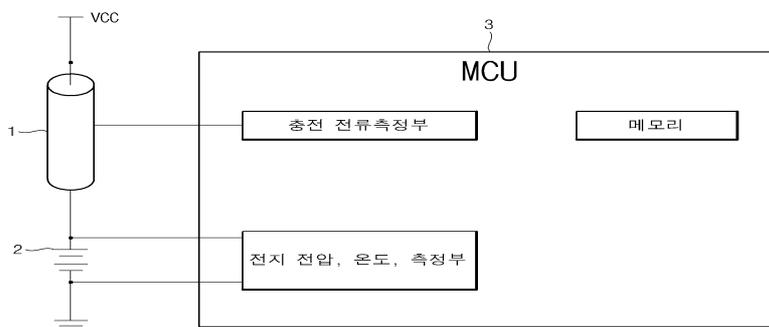
만충전 시간이 2 시간 이라고 가정한다면 CC(Constant Current) MODE 에서 CV(Constant Voltage) MODE로 변경시에는 C-Rate 값 이 작아지면서 1 Cycle 값의 기여치가 점점 작아지며 1 Cycle에 근접 하게 된다.

이때 방전값은 계산하지 않으므로 만충전이 한번도 일어나지 않는 조 건에서조차 Cycle Count 는 정확히 계산되고 있다는 것을 알 수 있다.

$$[식 3] \quad \text{남은수명예상(월단위)} = \frac{(2000CYCLE\text{최대기대수명잔존치} - \text{저장된수명CYCLE})}{1\text{개월간증가된CYCLE수}}$$

[식 3] 에 의해 시스템에 조합된 각 전지의 남은 기대수명은 ‘월’ 단위로 도출되나 Cycle 증가 단위가 ‘월’ 또는 ‘일’ 로 정해질 경우 수명 예상은 ‘월’ 또는 ‘일’ 단위로 계산되어 질 수 있다. 이러한 방법으로 예상 수명을 일정 단위로 시스템에 구성된 개개의 전지 전체에 적용하면 시스템에 구성되어 있는 수십개에서 수백개의 전지중 고장 예상전지를 미리 추적 정비할 수 있는 시스템이 가능하다.

아래의 그림은 2차전지 수명예측장치의 구성도 및 알고리즘을 나타내 었다.



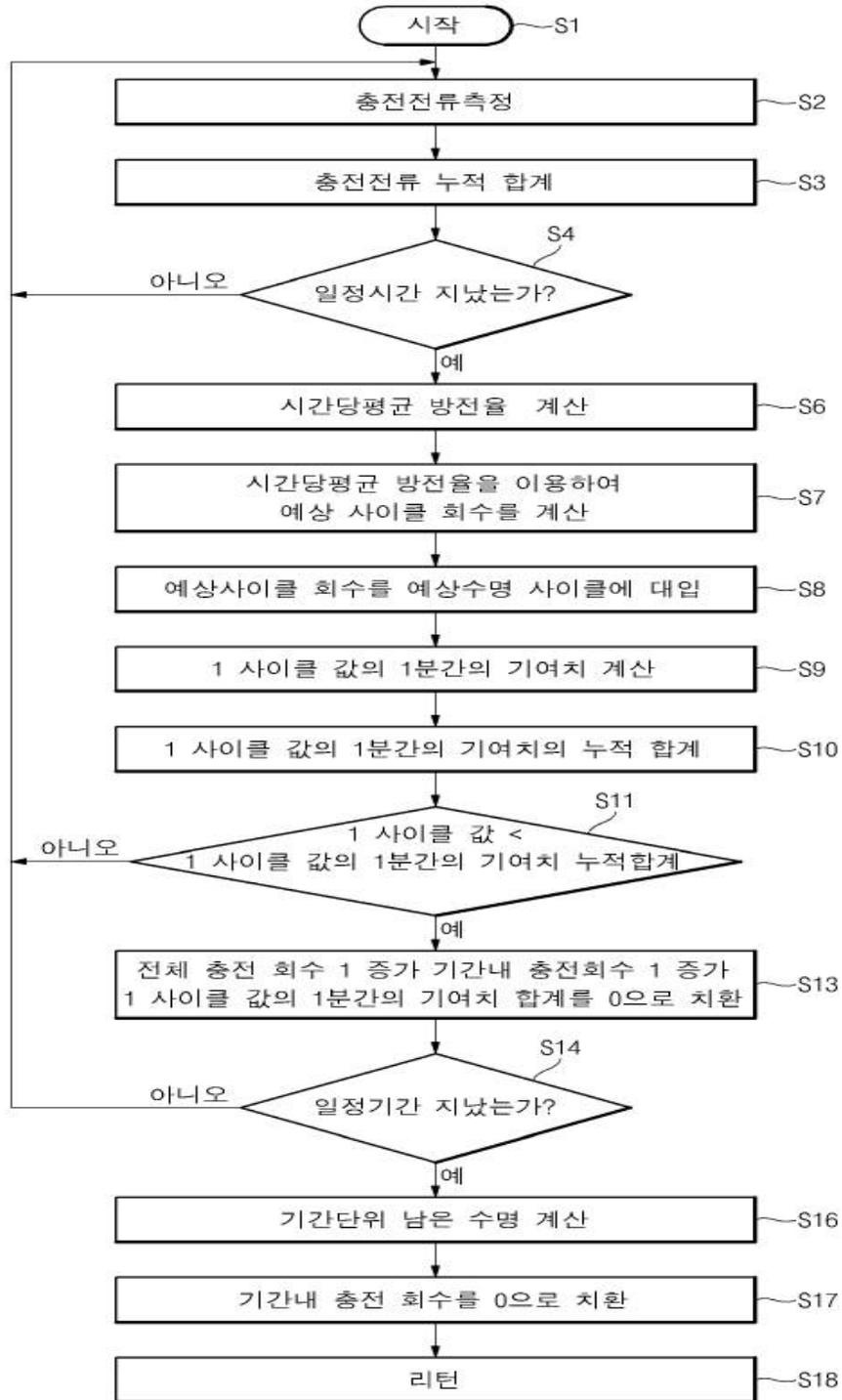
[그림 4] 2차전지 수명예측장치의 구성도

전압원(Vcc)과 전지(2)의 사이에 설치되어 있는 전류센서(1)와 전지 전압, 온도 측정부가 전지(2)에 양단이 연결되어 있으며, 충전전류를 측정 및 합산하여 충전전류 합계를 산출한다.

충전전류 측정치를 누적하여 합산한지 일정시간이 지난 경우에 충전전류 합계를 시간으로 나누어 시간당 평균 방전율을 산출하고, 시간당 평균 방전율을 이용하여 예상 Cycle 회수를 산출한다.

예상 Cycle 회수를 예상수명 Cycle 로 대입하여 1 Cycle 의 시간당 기여치를 산출하고 이를 누적하여 적산값을 산출한다.

1Cycle의 시간당 기여치 적산값이 1Cycle 보다 큰 경우 전체 충전회수와 기간내 충전회수를 1씩 증가시키고 1Cycle의 시간당 기여치의 적산값을 0으로 치환하고, 계산을 시작한지 일정기간이 경과된 경우에 시간단위로 남은 수명을 산출하고, 기간내 충전회수를 0으로 치환하면서 시작위치로 리턴하도록 제어하는 마이크로 컨트롤러(3)를 포함하여 이루어진다.



[그림 5] 수명예측 알고리즘

본 연구의 2차전지의 수명 예측방법의 구성은, 동작이 시작되는 단계 (S1)와, 충전전류를 측정하는 단계(S2), 충전전류 측정치를 합산하여 충전전류 합계를 산출하는 단계(S3)로 시작된다.

이후, 충전전류 측정치를 누적하여 합산한지 일정한 시간이 지났는지를 판단하고(S4) 충전전류 측정치를 누적하여 합산한지 일정한 시간이 지난 경우에 충전전류 합계를 시간으로 나누어서 시간당 평균 방전율을 산출한다.

시간당 평균 방전율을 이용하여 예상 사이클 회수($f(x)$)를 산출하고 (S7) 예상 사이클 회수를 예상수명 사이클로 대입한 후(S8) 1사이클값의 시간당 기여치를 산출(S9)한다.

1사이클값의 시간당 기여치를 누적하여 적산값을 산출하고(S10) 1사이클값의 시간당 기여치의 적산값이 1사이클 보다 큰지를 판단하고 (S11) 1사이클값의 시간당 기여치의 적산값이 1사이클 보다 큰 경우에는 전체 충전회수 1 및 기간내 충전회수를 1증가시키고 1사이클값의 시간당 기여치의 적산값을 0으로 치환한다.(S13)

계산을 시작한지 일정기간이 경과되었는지를 판단하여(S14) 계산을 시작한지 일정기간이 경과된 경우에 기간단위로 남은 수명(P)을 산출하고(S16) 기간내 충전회수를 0으로 치환한 후(S17) 시작위치로 리턴하는 단계(S18)로 이루어진다.

제 3 장 실 증

본 장에서는 실제 설치되어 10년째 운영중인 비상전원용 리튬이온 전력저장 장치에서 수집된 데이터에 의거하여 수명예측 알고리즘을 대입하여 계산 그 예상수명을 예측 하였다. 실제 잔존 용량은 서인천발전본부의 실제 테스트에 의거하여 잔존 용량과 예상 수명과의 차이를 파악하고 실제 알고리즘에 의해 도출된 결과와 비교하여 그 신뢰성을 입증하였다.

1. 발전설비 적용



[그림 4] 설치된 리튬이온 전지



[그림 5] 기존 연축전지

[그림 4]은 한국 서부발전 서인천 발전본부 1호기에 2007년 설치된 리튬이온 전지이고 2006년 삼성전자에서 생산된 18650 Type의 전지를 직병렬로 연결하여 5kW급으로 구성 후 27대를 다시 병렬로 연결함으로써 연축전지 2800Ah 전지를 대체하도록 설치되었다.

최소 1분에 1회 자체 데이터를 중앙에 설치된 서버에 송신하게 설계 되었으며 이 데이터는 일, 월, 년 단위 DB로 기록 되도록 설계되어 있

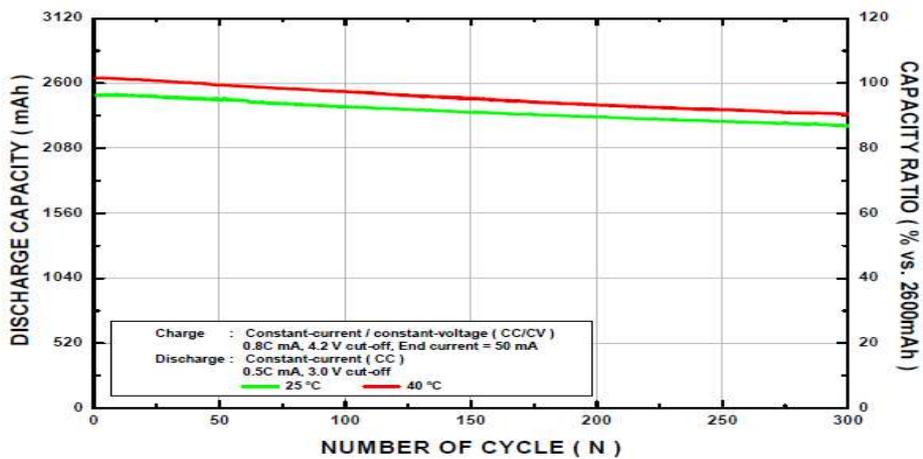
다. [그림 5]는 기존 연축전지 시스템이고 [표 2]에 서인천본부 비상전원장치 2차전지의 교체년도를 정리하였다.

호기	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
교체시기	'07	'09	'09	'11	'10	'09	'10	'12

[표 2] 서인천본부 비상전원장치 2차 전지 교체년도

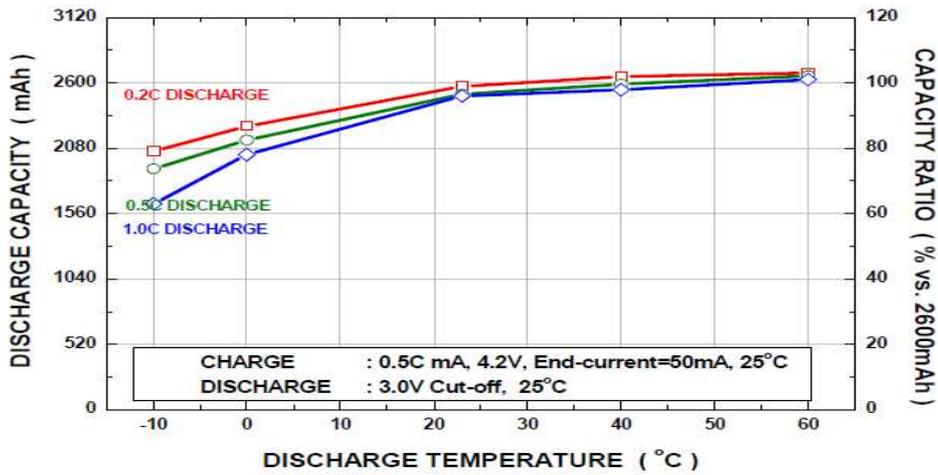
기존에 설치된 리튬이온 전지의 경우 [그림 2]와 같은 DOD별 Cycle 특성표가 제공되지 않았다. 약 십여년 전에는 국내 대기업의 경우에도 [그림 2]와 같은 도표를 제작하는 기법 및 제작이유를 정확히 인지하지 못하였기 때문이다.

따라서 [그림 6], [그림 7], [그림 8], [그림 9] 와 같이 주어진 도표를 참고하여 Matlab Curve Fitting Tool 로 [식 1]을 도출하여 [그림 10]에 그래프로 표현하였다.



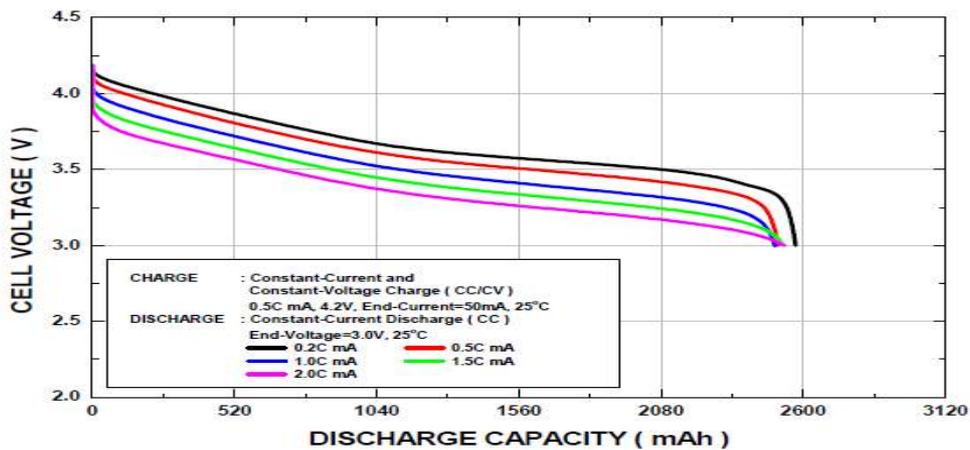
[그림 6] Cycle별 용량 감소표

그림 6의 X축은 전지의 Cycle 수이고 Y축은 각 Cycle 별 전지의 용량 감소 상태를 나타내고 있다.



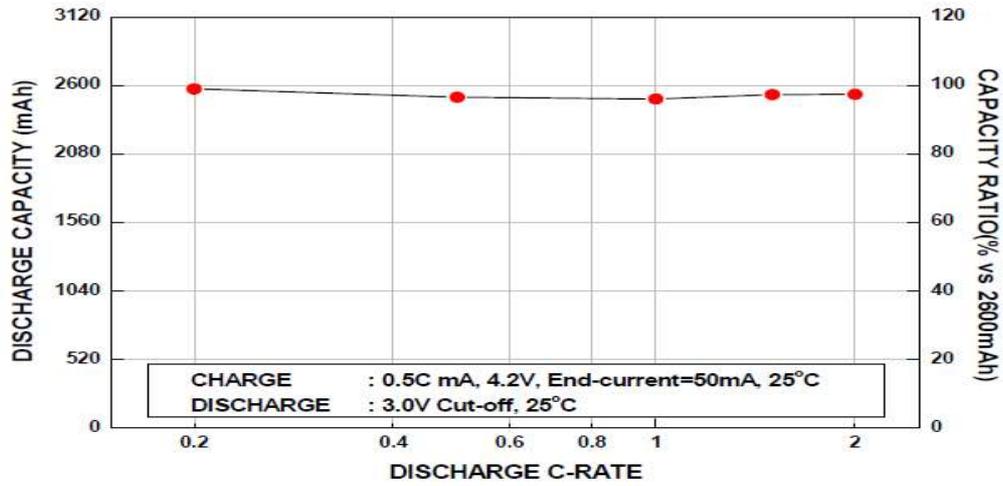
[그림 7] 온도별 용량특성표

X축은 전지의 주변 온도를 나타내고 있고 Y축은 온도에 따른 전지 용량의 변화를 보여 주고 있다 리튬전지는 방전시 전지자체의 발열이 일어나므로 온도 변화에 따른 용량변화는 실험실 기준으로 엄격히 제한된 상태에서 측정되었다.



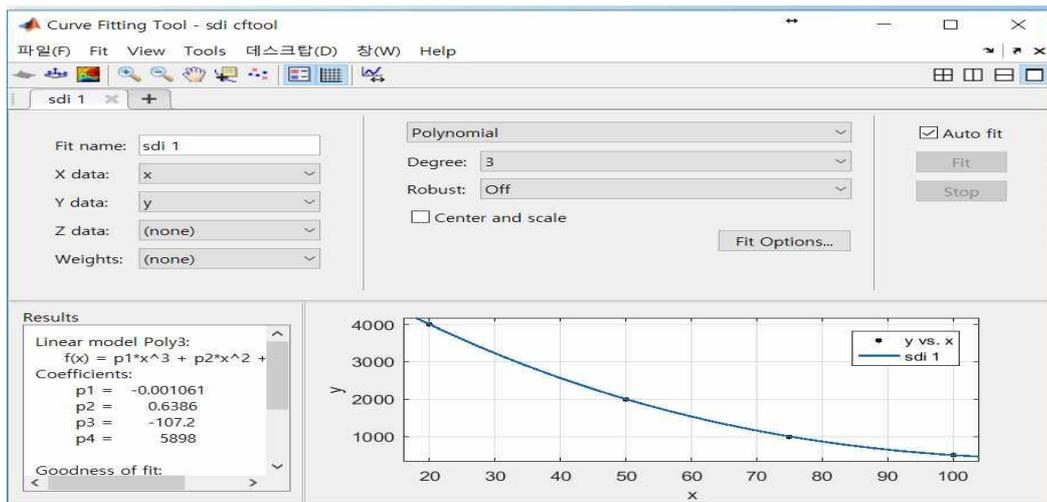
[그림 8] DOD별 전압특성표

X축은 방전전류의 크기이고 Y축은 그때의 전지전압의 드롭을 나타낸다.



[그림 9] DOD별 용량특성표

X축은 방전전류의 크기 변화이고 Y축은 그때의 전지 용량의 변화를 나타내고 있다



[그림 10] 추출된 다항식 및 그래프

본 논문에서는 서인천 발전본부에 설치된 리튬이온 전지 BMS 관제장치에 기록된 10년치 데이터를 각 전지별 데이터로 재정리 하고 각 전지

의 Cycle 특성에 따른 기여치를 고려하여 실제 산출된 용량값(실측치 잔존용량)와 본 논문에 따른 결과를 비교하여 논문을 실증 하였다.

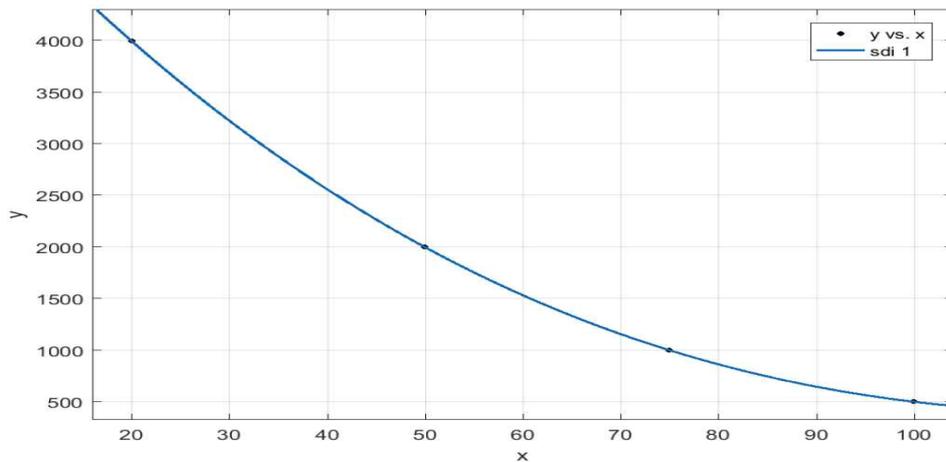
2. 데이터 분석

한국 서부발전 서인천 발전본부 1호기 DC 전원계통에 연결된 리튬전지 전력 저장장치의 실제 데이터를 기준으로 본 논문의 알고리즘을 검증 하였다.

기 설치된 삼성전자의 리튬이온 전지의 DOD 별 Cycle 데이터는 제조업체에서 제공된 데이터를 근거로 작성하였고 이 데이터를 근거로 다항식을 도출하여 [그림 11]과 같이 그래프로 정리하였다.

이때 산출된 예상 사이클 회수 ($f(x)$)는 수식 ($f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$)로 산출 하였다. 계산된 상수는 [식 4]와 같다. [식 4]에서 예상 Cycle 횟수($f(x)$)는 최소 500에서 최대 4500 사이의 값으로 결정된다.

[식 4]	$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$
	$p1 = -0.001061$
	$p2 = 0.6386$
	$p3 = -107.2$
	$p4 = 5898$



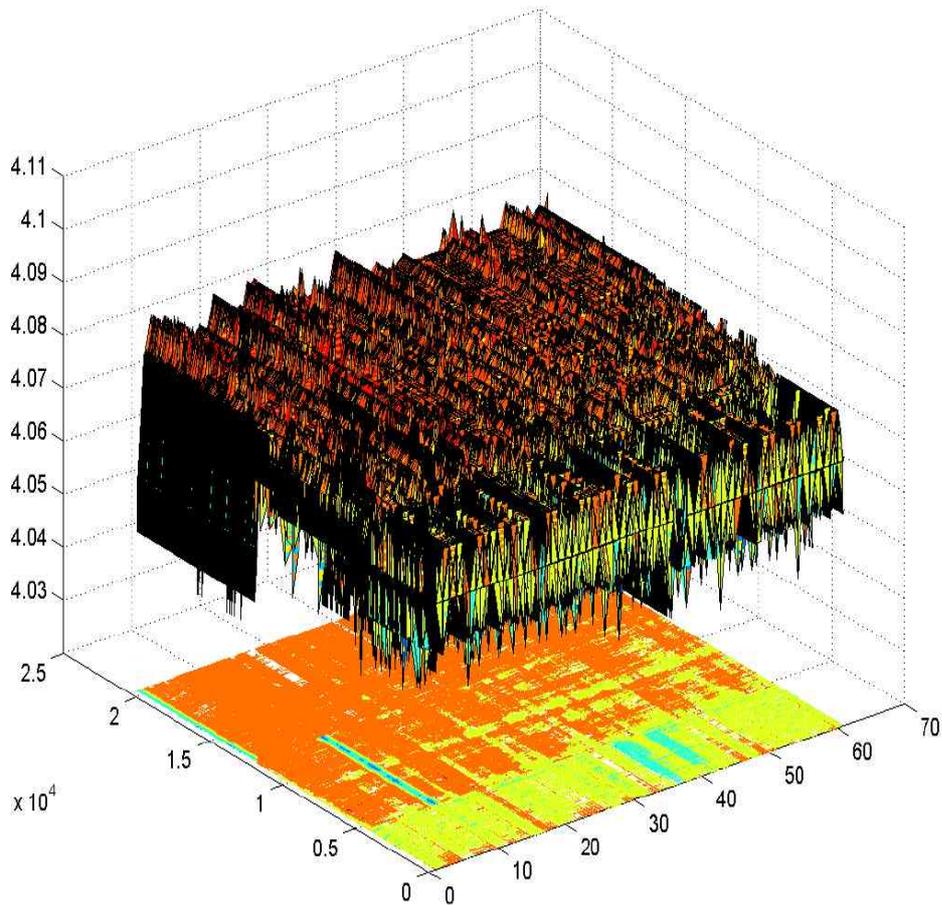
[그림 11] 다항식으로 표현된 그래프

한국 서부발전 서인천 발전본부 1호기에서 사용중인 리튬이온 전지의 데이터를 추출 하였다. 이 데이터는 2007년부터 2017년 까지 약 10년간 서버에 자동 저장된 리튬이온 전지의 전압, 온도, 전류, 데이터 이며 약 1분에서 5분 사이의 시간간격으로 데이터가 축적 되었다.

[그림 12]은 서인천 발전본부 1호기에 설치된 리튬이온 전지 27대중 첫 번째 전지에서 추출된 10년간의 데이터를 3차원 도식하여 표현한 그래프이다.

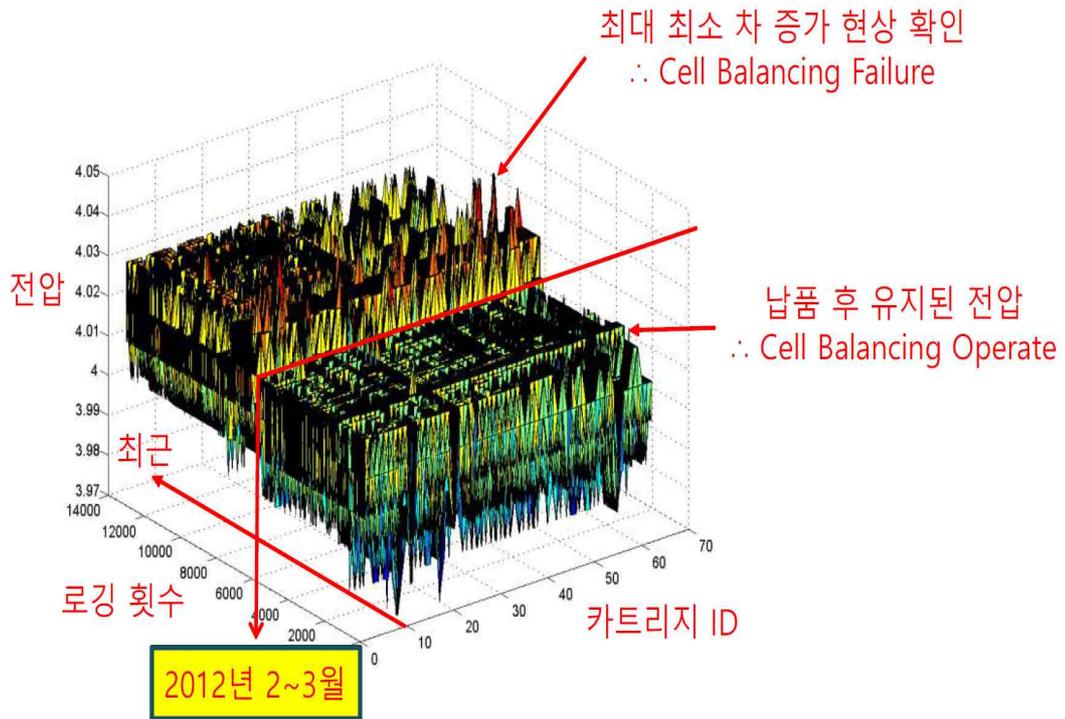
Y축은 내부에 설치된 개별 리튬이온 전지의 전압이고 X축은 내부에서 직렬 연결된 개별 전지 60개의 번호이며 Z축은 10년간의 축적된 데이터 순서이다.

이 데이터를 활용하여 각각 1 Cycle 값의 기여치를 연산하여 [그림 5]의 수명예측 알고리즘을 이용하여 이를 연산하였다.



[그림 12] 서인천 발전본부 1호기 첫 번째 전지 데이터

상기의 예상 수명은 기본 데이터 축적분이 분단위로 설정 되어 데이터가 축적되어 있으므로 최소 연산 단위를 분 단위로 연산하고 최종 결과 출력은 월 단위로 연산하여 결과치를 도출 하였다. 실제 데이터를 분석한 결과 리튬이온 설치 후 2012년 3월경 이후 제품에 추가적인 전지 보강(추가)이 이루어진 것을 확인할 수 있었으며 이 부분은 [그림 13]에서 보여주고 있다.



[그림 13] 서인천 발전본부 1호기 두 번째 전지 데이터

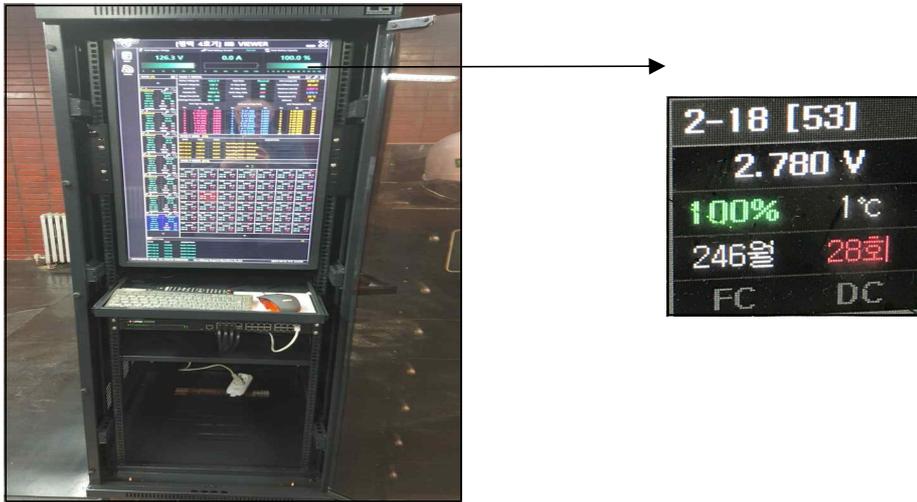
연산이 끝난 결과는 [그림 14]과 같이 시스템 외부에 전지의 Cycle 횟수와 함께 예상 수명이 월별로 표시되게 된다.

기본적으로 2차전지의 수명은 초기 용량이 100%로 한다면 그 용량이 80%가 되었을 때 수명이 다한 것으로 하고 있다

이것을 기준으로 서인천 발전소 1호기의 방전용량 시험 결과 (또는 평택 방전 시험결과) 와 당 논문의 시뮬레이션 결과치를 비교하여 보면 논문의 결과로는 0 Cycle 수명 즉 초기 용량 100% 대비 80% 용량이 남아 있다는 것을 추정 할 수 있고 이것은 실제 전지의 방전 시험결과로 검증하였다.

[그림 14] 는 실제 본 논문의 알고리즘이 적용된 실제 제품에서 수명 예상치가 표현되는 것을 보여 주고 있다.

58번째 전지가 246월의 예상 수명이 남아 있다는 것을 보여주고 있고 현재까지의 Cycle은 28회 인 것을 보여 주고 있다.



[그림 14] 리튬전지 예상 수명을 제품에 적용 예

제 4 장 결 론

현재까지의 수명예측 방법은 전지의 종류나 구성 재질에 관계없이 전지의 열화도, 전지의 전압 변화, 전지의 내부 저항변화 측정값을 적산하거나 기록하는 방법 등으로 전지의 기대수명을 예상하는 방법을 사용하여 왔으나 예측되는 전지의 기대 수명치는 일정한 사용 기간이 경과되어야 하고 전지 사용 중 특정 조건이 만족되어야 하는 등의 문제가 있었다. 또한, 충방전 전류의 적산치 및 충전 방전 전압의 변화를 추적함으로써 정확한 측정치가 항상 수반되어야 하므로 시스템에서 전류치, 전압치, 온도 등 외부 요건을 정확히 측정할 수 있는 외부 제어장치가 필수적으로 구비 되어야 하고 그 제어장치의 정확도에 따라 전체 시스템의 기대수명치의 정확도가 좌우된다고 할 수 있다. 더불어, 충방전 조건에서 전지의 수명이 다할 때까지 만충전, 만방전이 한번도 이루어지지 않는 경우 등 일어날 수 있는 여러가지 충방전 조건에 모두 대응할 수 없어 정확한 수명을 예측하기는 어려운 점이 있었다.

본 연구 보고서는 각 전지 제조업체에서 제공하는 전지의 DOD(Discharge of Depth) 별 Cycle 데이터를 근거로 기존의 일반적인 수명 예측장치의 예측 정확도를 개선하여 전지 제조업체별 전지의 상세한 수명 예측을 가능하게 하는 방법과 전지의 개별 수명 예측을 해야 하는지에 대한 필요성을 설명하였다.

참 고 문 헌

- 1) IEEE 1491-2012 Guide for Selection and use of Battery Monitoring Equipment in Stationary Application
- 2) 이차전지의 상태 감시 및 수명예측 알고리즘 개발(박재범, 김병기, 송석환, 노대석, 한국기술교육대 전기전자통신공학부) Development of State of Charge and Life Cycle Evaluation Algorithm for Secondary Battery.
- 3) 전기자동차용 리튬이온전지를 위한 SOC 추정 및 센서 고장검출 (한만유, 이기상) Estimation of State of Charge and Sensor Fault Detection of a Lithium ion in Electric Vehicle
- 4) 충전 전압 특성을 이용한 리튬 이온 배터리의 잔존 수명예측(심성흠, 강진혁, 안다운, 김선일, 김진영, 최주호, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과) Remaining Useful Life Prediction of Li-Ion Battery Based on Charge Voltage Characteristics
- 5) 하이브리드 선박용 리튬 배터리의 저가형 감시시스템 구현(권혁주, 김민권, 이성근) Low price type inspection and monitoring system of lithium ion batteries for hybrid vessels
- 6) 배터리 잔존 유효 수명 예측을 위한 전기화학 모델기반 고장 예지 및 건전성 관리기술(최요환, 김홍석) Prognostic and Health Management for Battery Remaining Useful Life Prediction Based on Electrochemistry Model

Abstract

The secondary battery has different life cycles depending on the constituent materials of the cathode active material, the cathode material, and the separator, depending on the manufacturer of the secondary battery.

Until now, the method of predicting the life span is a method of predicting the expected lifetime of a battery by measuring the deterioration degree of the battery, the voltage change of the battery, and the measurement value of the internal resistance change of the battery regardless of the type and composition of the battery. The life expectancy of the most important battery is not considered, and The predicted life expectancy of the battery has a problem such that a certain period of use must be elapsed and a specific condition must be satisfied while the battery is in use.

In addition, since accurate measurement values must be always accompanied by tracking changes in charge / discharge current and charge / discharge voltage, an external control device

capable of accurately measuring external conditions such as current value, voltage value, and temperature must be provided. The accuracy of the expected life span of the entire system depends on the accuracy of the control device.

In addition, it is difficult to predict a precise lifetime because it can not cope with various charging and discharging conditions that may occur, such as when full charge and full discharge are not performed until the battery reaches its end of life under charge and discharge.

The capacity and life expectancy of the secondary battery may be different depending on a slight difference between the battery components such as the cathode material, the anode material, the electrolyte, and the separator inside.

Therefore, the plurality of series-connected individual cells constituted in one system have the same life expectancy as all of the characteristics of the battery.

If you can accurately predict the individual life expectancy of each battery in the system, you can replace the problematic

battery in advance while maintaining the system of health

Such a method for predicting the individual expected lifetime can be achieved by predicting the life expectancy of the individual cells constituted in the system and providing them to the system body.

This study is to improve the prediction accuracy of existing general life prediction devices based on the cycle data of each battery's DOD (Discharge of Depth) provided by each battery manufacturer, And the need to predict the individual life of The battery.