

실시간 원격 배터리 점검 시스템의 개발

이종학¹, 김형원¹, 최우진[†]

Development of the Real-Time Remote Battery Inspection System

Jong-Hak Lee¹, Hyung-Won Kim¹, and Woojin Choi[†]

Abstract

Uninterruptible power supplies are extensively used as backup power in various applications such as telecommunication systems, Internet data centers, hospitals, and military technologies. Some of these applications require a considerable number of batteries, and the maintenance of such batteries is critical for the reliability of a system. However, batteries are chemical energy storage devices that deteriorate over time and frequently inspecting their performance and suitability is difficult. A real-time remote battery inspection system that applies electrochemical impedance spectroscopy is proposed and implemented in this study. The proposed system consists of a small inspection circuit and software for control. The former is developed to monitor the impedance variation of the battery and to diagnose its state. The validity and feasibility of the proposed system is proven by experimental results.

Key words: VRLA battery, AC impedance, Diagnosis, Remote inspection

1. 서 론

산업과 사회 모두가 네트워크 기반의 실시간 정보교환을 기본 인프라로 삼고 있으며, 고도의 기술 집약적 형태로 변화해 감에 따라 모든 요소에 고 신뢰성, 고품질의 전력공급이 요구된다. 최근 전력생산 및 설비기술의 고도화를 통해 양질의 전력이 공급되고 있으나, 사고에 의한 정전이나 전력품질의 저하는 여전히 피할 수 없는 문제이다. 이러한 경우를 대비하여 UPS와 같은 비상전원이 널리 사용되고 있으며, 이러한 비상전원의 에너지 저장장치로서 VRLA (Valve Regulated Lead-Acid) 배터리가 널리 사용되고 있다. 그러나, VRLA 배터리는 그 성질의 비선형성으로 인해 그 건전성을 정확히 예측하기 어려우며, 단일 셀의 불량만으로도 전체 시스템의 성능 저하 및 서비스 중단을 초래할 수 있어 함께 사용되는 설비의 신뢰성을 크게 저해할 가능성이 상존한다. 특히, VRLA 배터리는 제조업체에

따라 27% ~ 86%의 고장이 발생하는 것으로 미국전력연구원 (EPRI, the Electric Power Research Institute)의 보고서에서 집계되고 있다^[1]. 따라서 교통시스템, 통신시스템, 방송시스템과 의료시스템 같은 신뢰성이 매우 중요한 장비들은 일정한 사용시간이 경과 후 부분별 성능 저하 여부에 관계없이 VRLA 배터리 모듈 전체를 교체하여 고장을 사전에 방지하는 방법을 사용하므로 시스템의 유지 관리 비용을 증가시키게 된다. 이러한 문제점에 대한 대책으로 IEEE Std. 1188 및 450등과 같은 표준에서는 밀폐형 및 개방형 VRLA 배터리의 전압, 온도, 내부저항 값을 주기적으로 모니터링하여 성능이 저하된 셀이나 열 폭주 가능성이 있는 과열된 셀 또는 열화에 의해 내부저항이 증가된 셀 등을 사전에 감지하도록 권고하고 있다^[2-3]. 그러나 이러한 시험들은 육안검사, 농도 및 비중의 측정, 직접적인 충방전 시험과 같은 인력에 의한 검사를 포함하므로 많은 비용이 들고 번거로우며, 시험 중 사고 가능성이 있고 충방전 시험을 하는 동안에 발생하는 정전 시에는 비상전원의 가동이 불가능해지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 대용량 VRLA 배터리 모듈의 개별 VRLA 배터리를 개별적으로 모니터링하여 이상을 감지하고 사고를 사전에 차단할 수 있는 장비의 개발에 관해 서술한다. 개발된 시스템은 전기화학적 임피던스 분광법을 이용하여 측정된 VRLA 배터리의 전압, 온도 및 AC 임피던스를 측정하여

Paper number: TKPE-2016-21-1-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: cwj777@ssu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University
Tel: +82-2-820-0652 Fax: +82-2-817-7961

¹ Department of Electrical Engineering, Soongsil University
Manuscript received Aug. 29, 2015; revised Oct. 20, 2015;
accepted Dec. 23, 2015

VRLA 배터리의 상태를 진단하고, 실시간 원격으로 이를 관리서버에 원격 전송한 후 통계 처리함으로써 VRLA 배터리의 고장을 사전에 감지할 수 있다. 개발된 장치를 이용할 경우 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있으며, 성능이 저하된 셀만 교체하게 하여 시스템의 유지 및 관리 비용을 현저히 줄일 수 있다. 본 시스템의 사용상 이점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) VRLA 배터리의 충방전 없이 이상 유무를 감지할 수 있어 VRLA 배터리의 수명이 연장되고, 편리하며, 관리 비용 절감이 가능하다.
- 2) 원격제어를 통해 정확한 임피던스 데이터를 수집하고 통계 처리하므로, VRLA 배터리 상태의 온라인 검증이 가능하고 불량 VRLA 배터리 감지 시 교체 정보 알림이 가능하다.
- 3) 정기적인 VRLA 배터리의 전량 교체로 인한 과다비용 지출을 줄일 수 있으며, 중금속과 같은 환경 오염물질 양산을 최소화 할 수 있다.
- 4) AC Impedance 기술은 DC 임피던스를 이용하는 경우와 비교하여 더 정확하게 이상 감지가 가능한 장점이 있다.

2. 본 론

2.1 배터리의 성능과 임피던스

일반적으로 VRLA 배터리 성능에 영향을 미치는 요소들은 온도, 충방전율, 충방전 사이클 등 다수의 변수들이 있으며, 이러한 변수들에 의해 변화된 VRLA 배터리의 성능은 궁극적으로 VRLA 배터리의 내부 임피던스로 표현되게 된다. 따라서, 이러한 내부 임피던스를 이용하면 VRLA 배터리의 성능을 파악할 수 있으며, 이를 통해 VRLA 배터리의 이상이나 잔여 수명 등을 예측할 수 있다^[4-6].

현재 산업용 배터리의 90%이상을 차지하고 있는 VRLA 배터리는 일반적으로 기대수명의 절반을 넘어서는 순간부터 내부저항이 증가하여 용량이 급격히 저하된다. 그림 1은 VRLA 배터리의 용량과 임피던스 증가의 비교를 나타낸 것이다^[7-11]. VRLA 배터리의 용량은 초기에 증가하였다가 노화가 진행되면서 감소하게 되고, 임피던스는 증가하게 된다. 임피던스 값이 초기값보다 20% 상승하게 되면 그 이후 VRLA 배터리의 용량이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 IEEE 1188과 같은 VRLA 배터리의 열화판정을 위한 IEEE 표준이 제시한 방법은 임피던스, 컨덕턴스 또는 저항값을 측정하고 전체 셀의 평균치 또는 제조사에서 제공하는 기준값과 비교하여 20% 이상 초과 시 VRLA 배터리의 정밀 점검을 권고하고 있다. 또한, VRLA 배터리 제조사에서는 정격용량이 초기치 대비 80% 이하로 떨어지는 경우 교체를 권장하고 있다. 일반

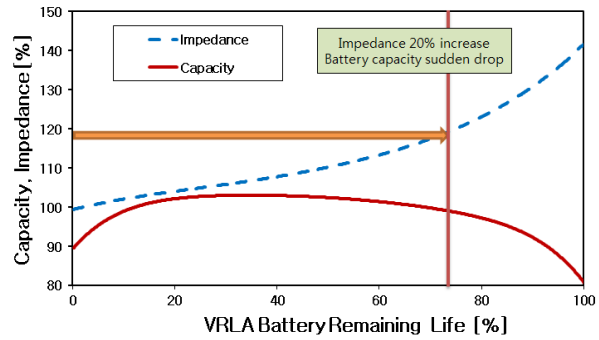


Fig. 1. Relationship between remaining life and impedance of the VRLA battery.

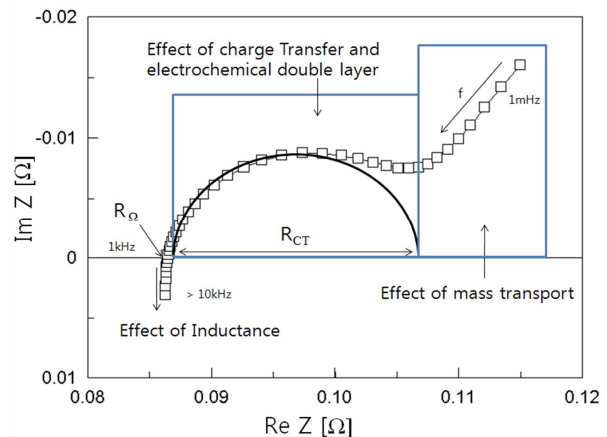


Fig. 2. Typical impedance spectrum of the VRLA battery.

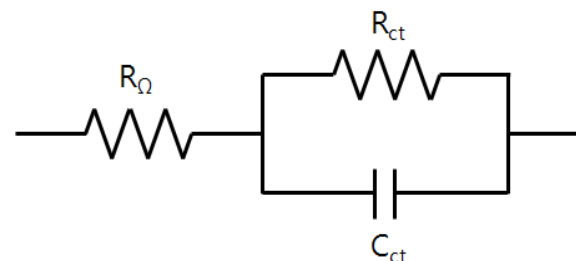


Fig. 3. Typical equivalent circuit of the VRLA battery.

적으로 이러한 경우 VRLA 배터리의 내부 임피던스 값이 기준치 대비 30%~50% 이상 초과되는 것으로 알려져 있어 이를 모니터링 할 경우 VRLA 배터리의 교체 시기를 알 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 임피던스 값이 초기값보다 20% 상승 시 이상이 있는 것으로 판별하여 사고를 미연에 방지하는 시스템을 개발하였다.

VRLA 배터리의 내부 임피던스를 측정하는 방법은 크게 DC 측정법과 AC 측정법으로 나눌 수 있다. DC 측정법은 방전전류의 변화분에 대해 상응하는 VRLA 배터리 전압의 변화를 이용하여 VRLA 배터리의 내부 저항값을 계산하는 방법이다. AC 임피던스 측정법은 특정 주파수 영역의 교류 섭동을 VRLA 배터리로부터 유도하고, 그에 의한 응답을 이용하여 주파수별 임피던스

를 검출하는 방법이다.

그림 2는 전형적인 VRLA 배터리의 임피던스 플롯이며, 그림 3은 전형적인 VRLA 배터리의 등가회로이다. 그림 2에서 보이는 것과 같이 VRLA 배터리의 임피던스는 인덕턴스, 전하전송(Charge Transfer)현상, 전기화학적 이중층(Electrochemical Double Layer) 및 물질 이동(mass transport)현상 등이 주파수 대역에 따라 각각 나타나게 된다^[12-14].

임피던스 플롯에서 알 수 있듯이 VRLA 배터리의 내부 저항은 R_{Ω} (Electrolyte Resistance + Metallic Resistance)과 R_{ct} (Charge Transfer Resistance)으로 나타낼 수 있는데, R_{ct} 는 온도, VRLA 배터리의 충전상태(SOC: State of Charge) 및 충전전류의 크기에 따라 그 값이 크게 변동하므로 이를 VRLA 배터리 상태 판단의 요소로 사용하는 것은 적합하지 않은 문제점이 있다^{[13],[15]}. 따라서 여러 조건(온도, 충전방전율, SOC 등)에 따른 변화가 크지 않고 VRLA 배터리의 노화와 용량에 영향을 끼치는 전해질 저항과 접촉 저항을 나타내는 R_{Ω} 의 변화를 모니터링 하면 VRLA 배터리의 열화를 감지할 수 있다^{[9],[15-16]}.

산업용으로 많이 사용되는 VRLA 배터리는 유지 및 보수가 필요 없는 밀폐형 구조를 하고 있어서 전해액의 농도나 비중을 측정할 수 없어 특히 이러한 비파괴 검사를 통한 내부 상태의 모니터링은 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 VRLA 배터리의 주파수 영역별 AC 임피던스를 측정하여 실수축에 근접한 지점의 R_{Ω} 값이 기준치로부터 일정 범위 이상 벗어날 경우 이를 감지하여 이상을 검출할 수 있는 실시간 원격 배터리 모니터링 장치를 개발하였다.

2.2 개발된 배터리 임피던스 측정 장치

먼저 개발된 시스템의 개략적인 블록도는 그림 4와 같으며 임피던스 측정회로는 그림 5와 같다. 대량의 VRLA 배터리가 사용되는 시스템을 대상으로 개별 VRLA 배터리별로 상태를 측정할 수 있도록 AC 임피던스 측정 장치가 부착되며, 개별 측정 장치는 컴퓨터에 설치된 주 프로그램의 명령을 받아 주기적으로 VRLA 배터리의 임피던스를 측정하여 이상여부를 판별하게 된다. 주 프로그램으로부터 개별 VRLA 배터리로의 지령과 각 VRLA 배터리에서 측정된 임피던스는 CAN(Controller Area Network) 통신을 이용하여 메인 프로그램이 설치된 컴퓨터로 전송된다.

그림 2에서 보듯이 VRLA 배터리의 AC 임피던스의 저항성분은 보통 수 mΩ 에서 수백 mΩ 정도의 범위에 분포하며, 측정 주파수가 1kHz를 넘어서면 인덕턴스 성분에 의한 저항성분이 커져서 측정된 임피던스의 의미가 적어진다. 따라서 개발된 장치의 측정 주파수 대역은 0.1Hz~1kHz로 하였으며, 섭동 전압의 크기는 상온에서의 열전압인 25mV 이하로 하였다. 섭동전류는 최대 5A

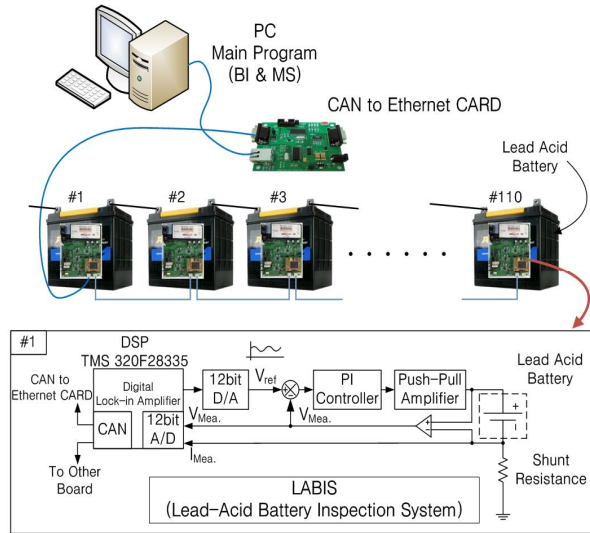


Fig. 4. Block diagram of the developed system.

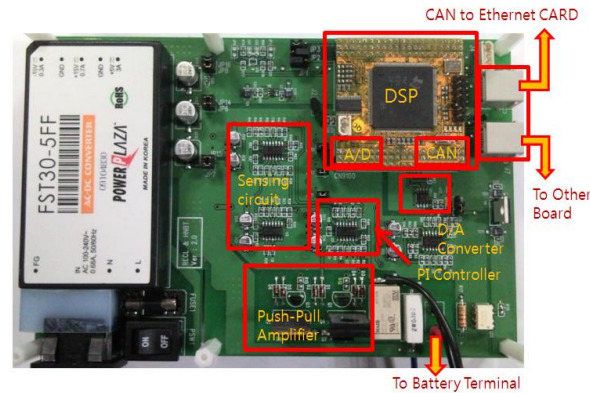


Fig. 5. Impedance measurement circuit for the VRLA Battery.

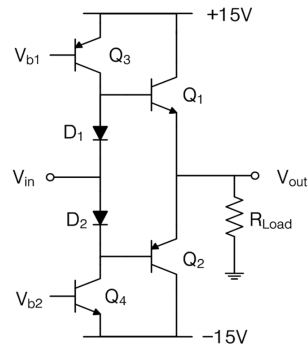


Fig. 6. Push-pull amplifier for the perturbation.

로 설계하여 5mΩ 정도의 작은 저항을 가진 대용량 VRLA 배터리의 임피던스까지 측정이 가능하도록 하였다. 임피던스 계산을 위해 소프트웨어로 구성된 Digital Lock-in Amplifier의 구현과 전체 시스템의 제어를 위해서 TI사의 32-Bit DSP인 TMS320F28335를 이용하였다. AC 임피던스 측정시스템은 임피던스 측정을 위해 섭동 신호를 발생하기 위한 푸쉬풀 타입의 증폭기, 안정한 증폭기의 동작을 위한 제어회로, VRLA 배터리의 전압 및

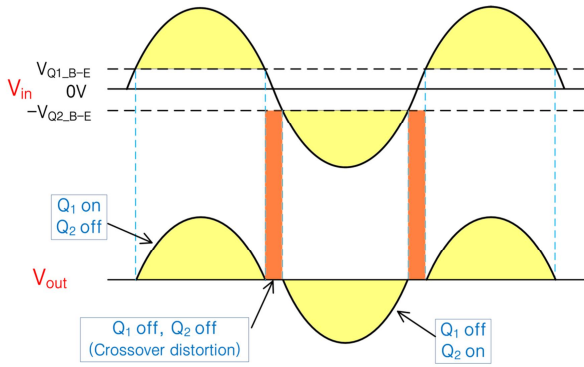


Fig. 7. Crossover distortion of the push-pull amplifier.

전류 검출부 그리고 통신회로로 이루어져 있다. 다음절에서는 부분별 상세한 설명을 진행한다.

2.2.1 섭동신호 생성을 위한 푸쉬풀 증폭기와 제어기

임피던스 측정을 위해 VRLA 배터리의 전압을 섭동시키기 위한 주파수별 섭동전압을 생성하는 부분이다. DSP는 초기 VRLA 배터리의 전압을 검출하여 VRLA 배터리의 전압에 상응하는 DC Offset과 섭동을 위한 원하는 크기 및 주파수의 신호를 더한 후, 이 값을 12-bit D/A 컨버터를 통해 아나로그 신호로 출력시켜 기준전압으로 사용하게 된다. 이후 기준전압은 VRLA 배터리 단자에서 검출된 전압과 비교되어 오차를 생성시키며 이 오차를 PI 제어하여 원하는 크기와 주파수를 가진 섭동신호를 안정적으로 생성할 수 있다. 전압 섭동을 위해서는 그림 6과 같은 푸쉬풀 타입의 증폭기를 사용하였다^[17].

그런데, 일반적인 푸쉬풀 증폭기는 크로스오버 왜곡(crossover distortion)의 문제점을 갖고 있다. 즉, 섭동신호가 양에서 음으로 바뀔 때 출력에는 비선형적인 파형이 나타나며, 이는 상단 또는 하단의 한 개의 트랜지스터가 턴 오프 될 때 다른 한 개의 트랜지스터의 턴 온이 정확하게 이루어 지지 않아 생기는 문제이다. 그림 7은 푸쉬풀 증폭기에서 발생하는 크로스오버 왜곡의 파형을 나타낸 것이다. 결국 각 스위치의 베이스-에미터 간 전압만큼의 전압강하가 생기게 되며 이것을 보상해 주어야 한다. 따라서 트랜지스터 사이에 다이오드를 삽입하여 전압강하를 보상한다. 각 다이오드의 순방향 전압강하가 스위치의 베이스-에미터 간 전압강하와 같게 설계하면 보상을 통해 출력의 왜곡을 막을 수 있다.

섭동전압은 푸쉬풀 증폭기의 출력 단에 연결되는 VRLA 배터리의 내부 임피던스 값에 때문에 기준전압을 추종하지 못하는 경우가 생길 수 있으므로 간단한 PI 회로를 이용하여 오차를 보상함으로써 정확성을 높였다.

2.2.2 VRLA 배터리의 전압/전류 검출부 및 통신회로

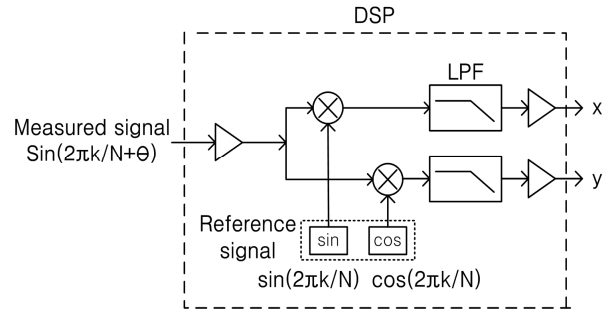


Fig. 8. Block diagram of the digital lock-in amplifier.

이 부분은 VRLA 배터리를 섭동시킨 후 섭동 전압 및 전류를 측정하는 부분이다. VRLA 배터리의 전압은 차동 증폭회로를 통해 측정하였고 전류는 Shunt 저항을 사용하여 측정하였다. 그 외 DSP의 A/D 컨버터의 보호를 위한 다이오드 클램핑 회로를 추가하였으며, 필터는 디지털 록인 앰프의 우수한 성능으로 인해 사용할 필요가 없다. 개발된 시스템은 총 110개의 VRLA 배터리까지 하나의 CAN-to-Ethernet 카드를 통하여 관리가 가능하며 각 VRLA 배터리는 CAN 케이블을 통해 연결되어 있다. 주 프로그램의 주기적인 명령에 따라 각 VRLA 배터리의 모니터링 장치는 VRLA 배터리의 AC 임피던스를 측정하고 측정된 임피던스의 크기 및 위상 값과 온도, 전압 등의 정보를 주 프로그램이 설치된 컴퓨터로 전송한다.

2.3 전기화학적 임피던스 분광법에 의한 VRLA 배터리의 이상유무 검지 알고리즘

2.3.1 Digital Lock-in Amplifier를 이용한 임피던스 계산

전기화학적 임피던스 분광법은 전기화학적 에너지 기기의 임피던스 스펙트럼으로부터 내부 상태 정보를 얻어내는 주요한 시험 방법이다^[18-20]. 이를 시행하기 위해서 사용되는 Digital Lock-in Amplifier는 일종의 AC Voltmeter로서, 측정된 섭동신호의 크기 및 위상에 비례하는 DC 전압을 측정한다(그림 8)^[20-21].

Digital Lock-in Amplifier의 가장 중요한 기능은 원하는 주파수의 신호만을 걸러내 출력함으로써 노이즈가 많은 환경에서도 특정 주파수 성분 신호의 크기와 위상을 측정하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 DSP에 꾸며진 Digital Lock-in Amplifier를 이용하여 배터리의 AC 임피던스 스펙트럼을 측정하였다.

측정된 신호는 측정 주파수를 포함한 형태로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)에서 A는 신호의 크기이고 θ 는 신호의 위상이다. 샘플링 주파수 f_s 는 한 주기의 샘플링 개수 N과 주파수 f의 곱인 $f_s = N \times f$ 로 나타낼 수 있고, 전체의 샘플링 개수 M은 한 주기의 샘플링 개수 N과 측정된 주기의 수 Q의 곱인 $M = N \times Q$ 로 나타낼 수 있다($k = 0, 1, \dots, M-1$)

$$V_{signal} = A \sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \theta\right) \quad (1)$$

측정하고자 하는 주파수 성분과 동일한 신호와 90° 위상차가 나는 2개의 참조신호(SIN 및 COS 파형)를 식(2) 및 (3)과 같이 생성하여 측정신호와 곱한 후 식 (4) 및 (5)와 같이 DC 성분을 계산하기 위해 전체 샘플링 수로 나누어 평균값을 구한다.

$$V_{sin_ref} = \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (2)$$

$$V_{cos_ref} = \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (3)$$

$$v_p = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} V_{sin_ref}(k) \cdot V_{signal}(k) \quad (4)$$

$$= \frac{A}{2} \cos(\theta)$$

$$v_q = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} V_{cos_ref}(k) \cdot V_{signal}(k) \quad (5)$$

$$= \frac{A}{2} \sin(\theta)$$

이렇게 계산된 v_p 와 v_q 를 식 (6)~(8)에 대입하면 측정 신호의 크기와 위상을 추출할 수 있다.

$$x = 2v_p \approx A \cos(\theta) \quad (6)$$

$$y = 2v_q \approx A \sin(\theta)$$

$$Magnitude = \sqrt{(x)^2 + (y)^2} = A \quad (7)$$

$$phase = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) = \theta \quad (8)$$

이를 측정전압과 측정전류 모두에 적용하면 각각의 크기와 위상 데이터가 출력이 되고, 출력된 데이터로부터 정확한 AC 임피던스의 크기와 위상을 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$Z \angle \theta_z = \frac{V \angle \theta_v}{I \angle \theta_i} \quad (9)$$

$$|Z| = \frac{V}{I}, \quad \theta_z = \theta_v - \theta_i$$

2.3.2 VRLA 배터리 이상유무 측정 알고리즘

그림 9는 VRLA 배터리의 이상유무를 판단하는 알고리즘의 흐름도이다. 주 프로그램에서 측정하고자 하는 VRLA 배터리의 ID와 함께 임피던스 측정 개시 명령을 보내게 되면, 각 보드는 주 프로그램에서 보낸 ID를 입력받게 되고 각 보드의 고유 ID와 동일한 ID의 보드가 동작하게 된다. 임피던스 측정 지령을 받은 보드에서는 임피던스를 측정하기 전, 먼저 VRLA 배터리의 DC 전

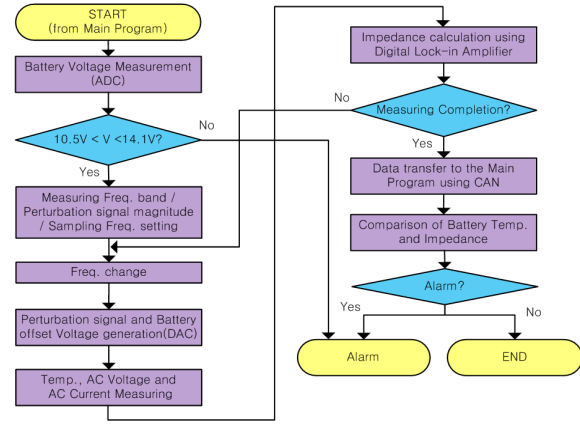


Fig. 9. Flow chart of the battery inspection algorithm.

압을 측정하여 DSP에 입력하고, 측정 주파수 및 샘플링 주파수, 섭동신호 등을 설정한다. VRLA 배터리의 DC 전압은 정확도를 높이기 위해 DSP A/D단에서 1초간 측정된 값을 평균한 후 사용한다. VRLA 배터리의 전압 값이 VRLA 배터리 사용전압범위인 10.5V~14.1V 이외의 값으로 나온다면 측정을 강제 종료하고 알람을 발생한다.

그 다음 DSP에서 VRLA 배터리 전압에 상응하는 DC Offset과 25mV의 섭동신호를 D/A 두 채널로 출력하여 기준전압을 생성하면 푸쉬풀 증폭기 회로가 VRLA 배터리를 섭동한다. 그러나 VRLA 배터리를 섭동하기 전에는 VRLA 배터리의 전압에 상응하는 기준전압이 없으므로 전압 차이에 의해 제어기가 제대로 동작하지 못하게 된다. 이 상태에서 푸쉬풀 회로에 VRLA 배터리가 연결되어 있으면 VRLA 배터리에 과전류가 흐르게 된다. 따라서 푸쉬풀 회로와 VRLA 배터리 연결단 사이에 릴레이를 삽입하여 VRLA 배터리의 DC 전압을 검출하고 그에 상응하는 전압을 출력한 후에 VRLA 배터리를 섭동시킬 때 릴레이를 턴온 시킨다. 모든 측정 주파수에서 임피던스 측정이 끝나면 릴레이는 다시 턴오프 상태로 동작하여 푸쉬풀 회로와 VRLA 배터리를 분리시킨다. 이렇게 섭동된 VRLA 배터리의 AC전압과 AC전류는 온도 정보와 함께 DSP의 A/D단에 입력된다. 입력된 AC전압, AC전류의 데이터로부터 Digital Lock-in Amplifier를 이용하여 측정 주파수의 임피던스를 계산한 후, 다음 측정 주파수로 넘어가 임피던스를 반복하여 측정한다. 측정 주파수대역에서의 임피던스를 모두 측정하면 CAN 통신을 통해 VRLA 배터리의 DC 전압, 임피던스 데이터(측정 주파수, 임피던스의 절대 값과 위상) 및 온도를 컴퓨터의 주 프로그램으로 전송한다. 주 프로그램에서는 입력받은 데이터로부터 임피던스 플롯을 나타내게 된다.

최초 VRLA 배터리를 연결한 경우 기준 임피던스 값을 선정하기 위해 일정 시간동안 30회의 AC 임피던스를 측정한다. 측정된 30회 임피던스 플롯에서 실수축에

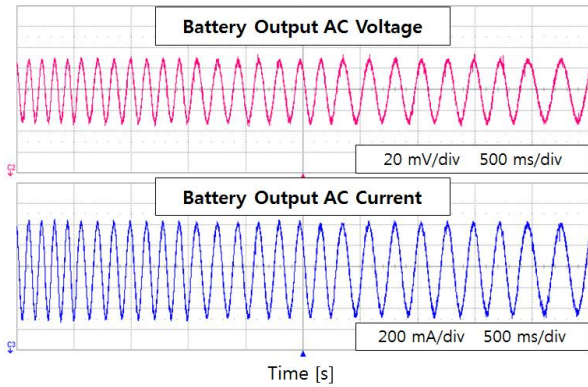


Fig. 10. Current and voltage perturbation waveforms for the impedance measurement.

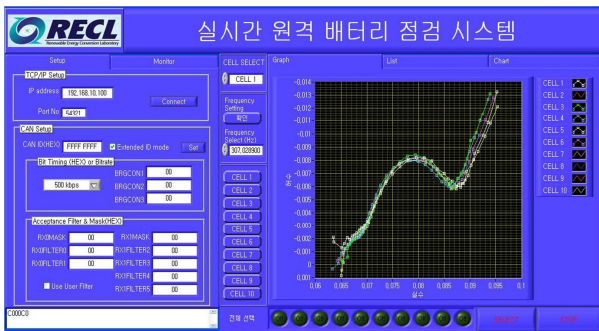


Fig. 11. Main window of the BIM software.



Fig. 12. Data window of the BIM software.

근접한 지점의 주파수를 선정하게 되고 선정된 주파수에서의 임피던스 평균값을 기준 값으로 저장한다. 이후 일정시간 간격으로 임피던스를 측정하고 기준 임피던스 값과 비교하여 20%이상 차이가 나게 되면 이상이 있는 것으로 판별한다. 이상이 있는 경우 주 프로그램은 관리자에게 경고 메시지를 보내 점검을 하도록 하여, 고장을 사전에 방지할 수 있다. 이와 같은 순서로 동시에 다수의 VRLA 배터리를 점검하고 이상 유무를 감지할 수 있다.

2.4 개발된 소프트웨어 및 실험결과

본 논문에서는 UPS용으로 많이 사용이 되는 아틀라스 BX사의 산업용 VRLA 배터리 ITX40을 이용하여 실험하였다. 공칭용량은 40Ah이고 공칭전압은 12V이며 총

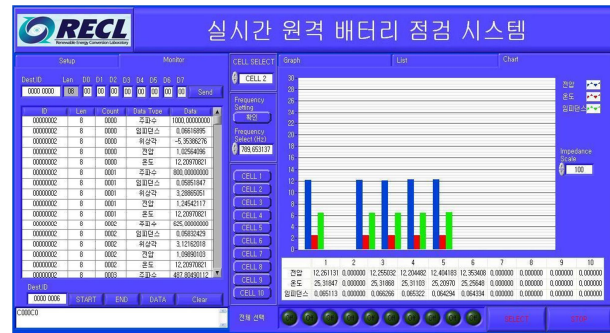


Fig. 13. Chart window of the BIM software.

TABLE I
MEASURED R_0 VALUES WITH DEVELOPED BATTERY INSPECTION & MANAGEMENT SYSTEM

VRLA Battery	Measurement Frequency [Hz]	R_0 [$m\Omega$]	Deviation [$m\Omega$]
Cell #1	789	65.1	0.0
Cell #2		66.3	-1.2
Cell #3		65.3	-0.3
Cell #4		64.3	+0.8
Cell #5		64.3	+0.7
Average[$m\Omega$]		65.1	
Standard Deviation[σ]			0.73

5개의 VRLA 배터리를 사용하였다. 그림 10은 개발된 장치로부터 측정된 VRLA 배터리의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 실험은 고주파에서 저주파의 순서로 진행되며 출력 파형은 주파수가 1k~10Hz까지는 10주기 10~1Hz까지는 8주기, 1~0.1Hz까지는 4주기가 출력되도록 설정하였다. 배터리 응답의 불안정성에 의한 부정확한 측정을 방지하기 위하여 각 주파수 섭동의 첫 주기와 마지막 주기의 파형은 임피던스 계산에 적용하지 않았다.

그림 11~13은 LabVIEW로 구성된 VRLA 배터리의 점검 및 관리 시스템인 BIM(Battery Inspection & Management) 소프트웨어이다. 먼저 그림 11은 주화면으로 좌측은 설정을 위한 부분이며 우측은 배터리의 임피던스 스펙트럼을 모니터링 할 수 있는 부분이다. 좌측 설정부분에서는 측정보드와 컴퓨터를 연결하는 IP 및 포트를 설정하고 임피던스 측정보드의 ID를 선택할 수 있으며, 우측 부분은 5개의 임피던스 측정보드로부터 전송받은 데이터를 나타내고 있다. 각 보드에서 전송받은 임피던스 데이터로부터 플롯을 그려 배터리의 상태를 직접 확인할 수 있다. 그림 11에 보이는 임피던스 플롯의 차이는 VRLA 배터리의 상태가 각각 다르기 때문에 나타나는 편차이다^[22]. 이렇게 측정된 각 VRLA 배터리의 AC 임피던스는 다른 VRLA 배터리와 비교되어 이상 유무를 판단하는데 사용한다.

그림 12에는 5개의 VRLA 배터리에서 측정된 모든 주파수의 AC 임피던스 및 온도, 전압 데이터를 확인할 수 있는 데이터 윈도우를 나타내고 있다. 실험을 통해 5개의 VRLA 배터리에서 측정된 R_{Ω} 의 평균값은 0.065 Ω 이다.

그림 13은 측정된 AC 임피던스 중 R_{Ω} 의 값과 온도, DC 전압을 비교할 수 있도록 차트를 보여주는 창을 나타낸다. 임피던스 플롯에서 초기 선정된 주파수의 AC 임피던스 값과 함께 DC 전압, 온도를 다른 VRLA 배터리와 비교하여 확인하고 기준 임피던스 값과 비교할 수 있다. 개발된 배터리 점검시스템과 5개의 VRLA 배터리를 대상으로 789Hz에서 얻은 R_{Ω} 값과 표준편차는 표 1과 같다.

개발된 소프트웨어에는 모든 VRLA 배터리에 설치된 측정 장치가 동시에 동작하는 전체실행 모드와 사용자가 임의로 측정하고자 하는 VRLA 배터리만을 선택하여 AC 임피던스를 측정하게 할 수 있는 일반모드가 있으며, VRLA 배터리의 이상이 판단되면 사용자와 관리자에게 동시에 메시지를 보내어 이상 셀을 교체 및 점검할 수 있도록 하는 알람 기능도 구현하였다. 또한, 주 프로그램이 있는 PC에서 설정한 웹 주소만 알면 어디서나 원격으로 모니터링 및 제어가 가능하도록 원격 제어 및 모니터링이 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서는 VRLA 배터리의 이상을 점검할 수 있는 AC 임피던스 측정 회로와 대용량 VRLA 배터리 모듈의 실시간 원격 감시를 위한 하드웨어 및 관리 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 장치를 통해 VRLA 배터리의 이상을 사전에 감지하여 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 성능이 저하된 셀만을 교체하여 시스템의 유지 및 관리 비용도 줄일 수 있다. 특히, 제안된 시스템은 전기자동차나 스마트 그리드용 에너지 저장장치와 같은 다수의 배터리를 사용하는 시스템에도 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] "New industry guidelines for the maintenance of stationary valve-regulated lead acid batteries," EPRI Technical Results, 1996.
- [2] "IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications," IEEE std. 1188-1996.
- [3] "IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications," IEEE std. 450-2002.
- [4] M. Broussely and G. Pistoia, "Industrial applications of batteries," Amsterdam, 2007.
- [5] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. L. Regtien, P. H. L. Notten, "Battery management systems," Philips Research book Series, Vol. 9, 2008.
- [6] J. H. Lee, S. H. Kim, W. Kim, W. Choi "A research on the estimation method for the SOC of the lithium batteries using AC impedance," *Transaction of Korean Institute of the Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 457-465, 2009.
- [7] G. J. Markle, "AC impedance testing for valve regulated cells," INTELEC 92, Washington. D.C.
- [8] E. Davis and D. Funk, "New industry guidelines for the maintenance of stationary valve-regulated lead acid batteries," AVO International Tech. Conf., Dallas Tx, 1996.
- [9] "Stationary battery guide: design, application, and maintenance," EPRI Technical Results, 2002.
- [10] V. H. Duong, N. T. Tran, Y. J. Park, and W. Choi, "Novel estimation technique for the state-of-charge of the lead-acid battery by using EKF considering diffusion and hysteresis phenomenon," *Transaction of Korean Institute of the Power Electronics*, Vol. 19, No. 2, pp. 139-148, 2014.
- [11] H. Kim, "Diagnosis of state of health(SOH) for battery management system(BMS)," *Transaction of Korean Institute of the Power Electronics*, Vol. 11, No. 6, pp. 558-562, 2006.
- [12] A. Jossen, "Fundamentals of battery dynamics," *Journal of Power Sources*, Vol. 154, pp. 530-538, 2006.
- [13] S. Buller, "Impedance-based simulation models for energy storage devices in advanced automotive power systems," Dissertation, RWTH Aachen, ISBN 3-8322-1225-6, 2002.
- [14] H. Blanke, O. Bohlen, S. Buller, R. W. De Doncker, B. Fricke, A. Hammouche, D. Linzen, M. Thele, and D. U. Sauer, "Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicle," *Journal of Power Sources*, Vol. 144, pp. 418-425, 2005.
- [15] E. Karden, "Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries," Dissertation, RWTH Aachen, Germany, 2001.
- [16] A. Fasih, "Modeling and fault diagnosis of automotive lead-acid batteries," The Ohio State University, 2006.
- [17] B. Razavi, "Fundamentals of microelectronics," Wiley, Preview Edition, 2006.
- [18] A. J. Salkind, P. Singh, A. Cannone, T. Atwater, X. Wang, and D. Reisner, "Impedance modeling of intermediate size lead-acid batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 116, pp. 174-184, 2003.
- [19] J. R. Macdonald, "Impedance spectroscopy," John Wiley & Sons, Inc. Publication, 1987.

- [20] M. Ordonez, M. O. Sonnaillon, M. T. Iqbal, J. E. Quaioco, and F. J. Bonetto, "An embedded DSP based frequency response analyzer for fuel cells monitoring and characterization," *IEEE Power Electronics Specialist Conference, IEEE PESC 06', Jeju (Korea)*, June 18-22, 2006.
- [21] J. H. Lee and W. Choi, "Development of the low cost impedance spectroscopy system for modeling the electrochemical power sources," *Transaction of Korean Institute of the Power Electronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 46-54, 2008.
- [22] Y. Barsukov, "Challenges and solutions in battery fuel gauging," www.ti.com, work book 1-1 ~ 1-9, 2004.



이종학(李鍾鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 송실대 전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2011년~현재 (주)POSCO ICT R&D 센터 선임연구원.



김형원(金衡源)

1972년 5월 31일생. 1998년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2000년 송실 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 동 대학원 전기공학부 수료(박사). 2012년~현재 (주)크로니 기술연구소 수석연구원.



최우진(崔宇鎭)

1967년 1월 7일생. 1990년 송실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Texas A&M University 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년~1998년 (주)대우중공업 중앙연구소 전자기술실. 2005년~현재 송실대 전기공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집이사.