

납 축전지의 병렬운전시 부하분담률 개선

潘 漢 植, 崔 圭 夏

Improved Load Sharing Rate in Paralleled Operated Lead Acid Batteries

Han-Sik Ban, Gyu-Ha Choe

요 약

전지는 화학에너지를 기계적인 처리과정 없이 전기에너지로 직접 전환하는 장치이다. 부하전압과 부하전류의 용량에 따라 단위전지를 직·병렬 연결하여 사용하게 되며, 전지의 병렬운전은 단독운전 보다 전압강하를 더 천천히 발생시키므로 전압강하에 민감한 전력변환장치들의 효율에 밀접한 관계를 가지고 있다. 병렬운전의 필요성과 장점 때문에 대부분의 축전지를 사용하는 시스템은 병렬운전을 하고 있고, 반면에 신·구 축전지 사이에서 순환 전류가 흐르고, 자기방전이 일어나는 단점 또한 가지고 있다. 신 축전지에서 충·방전 전류가 과다하게 흐르는 불평형 현상과 이로 인해 축전지의 수명단축을 일으키게된다. 본 논문에서는 마이크로 프로세서를 사용하여 신·구 축전지 사이의 불평형 전류를 검출하고 외부저항을 첨가시켜 내부저항의 차이에 대한 감소효과를 얻어 불평형 전류를 보상하였다. 이를 실험을 통해 구현하였다.

ABSTRACT

A battery is the device that transforms the chemical energy into the direct-current electrical energy directly without a mechanical process. Unit cells are connected in series to obtain the required voltage, while being connected in parallel to organize capacity for load current and to decrease the internal resistance for corresponding the sudden shift of the load current. Because the voltage drop down in one set of battery is faster than in two one, it may result in the low efficiency of power converter with the voltage drop and cause the system shutdown. However, when the system being driven in parallel, a circular-current can be generated. The charging current differs in each set of battery because the system including batteries, rectifiers and loads is connected in parallel and it makes the charge voltage constant. It is shown that, as a result the new batteries are heated by over-charge and over-discharge, and the over charge current increases rust of the positive grid and consequently shortens the lifetime of the new batteries. The difference between the new batteries and old ones is the amount of internal resistance. In this paper, we can detect the unbalance current using the micro-processor and achieve the balance current by adjusting resistance of each set. The internal resistance of each set becomes constant and the current of charge and discharge comes to be balanced by inserting the external resistance into the system and calculating the change of internal resistance.

Key Words : Battery, Unbalanced current, Circular-current, Parallel connection

1. 서 론

축전지는 저장된 전력을 순간하지 않고 부하설비에 공급하는 것이 그 역할이며, 비교적 전기용량이 큰 산업용전지는 납 축전지, 니켈-카드뮴 축전지, 공기습전지 등으로 분류한다. 통신용전원으로 사용되고 있는

축전지는 대용량을 필요로 하는 관계로 주원료로 납과 황산을 사용하는 납 축전지와 알칼리전지를 많이 사용하고 있다. 통신용 직류전원으로 최대 직류 48[V] 4800[A] 단일 시스템을 구성하기 위해 국내생산최고용량 단위전지 2[V] 4400[AH]의 전지를 사용하여 직렬 연결로 적정전압 48[V]를 만들고, 보상시간을 3~12시

간 부하전류에 지속될 수 있는 용량을 구성하기 위해 병렬로 조합하여 사용하고 있다. 이때 초기 투자를 경감하기 위해 부하의 증가에 따라 정류기 유니트와 축전지를 병렬로 접속증설하여 전원 용량을 증가시키는 방법을 사용하는데 국내에서 최대로 연결하고 있는 병렬 조 수는 6조까지 운용하고 있다. 제작회사와 제작일자가 다르고, 용량이 서로 다른 축전지를 병렬로 운용하는 경우가 일반적이기 때문에 병렬 운용할 경우, 신, 구 축전지 사이에서 순환전류가 발생하고 자기방전이 일어나게 된다. 내부저항 증가로 충전전류가 조별로 다르게되고, 과대한 충전전류는 양극격자 또는 심금의 부식을 증가시키는 원인이 되며, 새로 설치한 축전지가 내부저항이 낮아 과방전이 되므로 방전심도가 크게되고, 수명을 단축시키게 된다. 본 논문은 납 축전지의 병렬운전의 필요성과 이에 따라 발생하는 불평형 전류를 감소시키기 위한 방식을 제안하고 실험을 통해서 이를 검증하였다.^[1]

2. 축전지의 특성

2.1 축전지 동작 원리

전지의 기전력 E 는 전지를 통하여 흐르는 전류가 없을 때, 양극판 전위 E_+ 와 음극판 전위 E_- 의 차에 있다.

$$E = E_+ - E_- \quad (1)$$

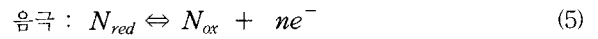
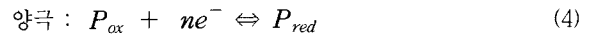
전지와 외부회로를 통한 전류가 있을 때, 그것의 내부저항에 의한 전위는 떨어지고, 외부회로에서의 전위는 개방된 양극사이의 전위차보다 적다. 외부회로의 저항 R , 전지의 내부저항 r 및 기전력 E 일 때, 회로를 흐르는 전류 I 는 식 (2)와 같다.

$$I = \frac{E}{R+r} \quad (2)$$

전지의 기전력 E 와 부하단자전압 E' 의 비는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{E'}{E} = \frac{R}{R+r} \quad (3)$$

충전상태의 양극 및 음극의 활동물질을 P_{ox} 및 N_{ox} 로 나타내고, 방전상태의 양극 및 음극활동물질을 P_{red} 및 N_{red} 로 표시하면 양극은 방전 때에 전자 e^- 을 취하여 환원되고, 음극은 e^- 을 방출해서 산화된다.



전지의 방전에 따른 활물질인 화학에너지($-\Delta G$, G : 자유에너지)의 감소는 외부회로에 유입되는 전기에너지와 같다. 그러므로 에너지의 형태는 변화하여도 양자는 동일한 것으로부터 전지의 기전력 E 는 다음 식으로 표시되는데 단자전압과 거의 같은 값을 갖는다.

$$-\Delta G = nEF \quad (6)$$

$$(E = -\frac{\Delta G}{nF})$$

또, m_1 몰의 물질 A, m_2 몰의 물질 B가 반응해서 n_1 몰의 물질 X, n_2 몰의 물질 Y가 되고, 기전력 E 는 열역학적으로 다음의 Nernst 식으로 표시된다.^[6] 여기서 R 은 기체정수, T 는 절대온도, a 는 이러한 물질의 활동 량이다. E_o 는 전체물질의 활동량이 1일 때의 값이고, 표준 기전력이라 부른다.

$$E_b = E_o - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a \frac{n_1}{X} \cdot a \frac{n_2}{Y} \cdot \dots}{a \frac{m_1}{A} \cdot a \frac{m_2}{B} \cdot \dots} \right) \quad (7)$$

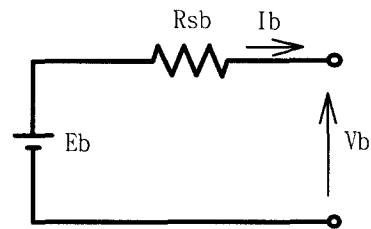


그림 1 납 축전지 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of lead-acid battery

납 축전지의 모델은, 기전력에 직렬저항이 삽입된 그림 1로 표시된 등가회로와 같으며, 식 (8)과 같이 표현된다.

$$V_b = E_b - I_b \times R_{sb} \quad (8)$$

여기서 V_b : 납 축전지 1셀의 단자전압

E_b : 납 축전지 1셀의 기전력

I_b : 1 셀당의 충전전류

R_{sb} : 납 축전지 1셀의 내부저항

납 축전지가 직렬로 N_{bs} , 병렬로 N_{bp} 접속된 납 축전지 시스템이 구성되기 때문에 축전지 단자전압 V_B , 전류 I_B 는 식 (9)와 (10)과 같다.

$$V_B = V_b \cdot N_{bs} \tag{9}$$

$$I_B = I_b \cdot N_{bp} \tag{10}$$

이때 납 축전지의 기전력과 내부저항은 충전상태에 따라 변화한다.^[2]

2.2 전지병렬접속과 전력변환장치의 효율

축전지의 방전 시에 초기전압은 빠르게 감소하다가 화학반응이 활성화되면 정상상태의 속도로 감소한다.

동일 용량의 축전지조에서 2조 병렬운전에 의한 방전시간이 1조에 의한 방전시간 보다 약 3배 더 지속됨을 그림 2와 같이 측정을 통해서 알 수 있었다. 그림 2는 같은 용량의 축전지를 병렬운전 유무에 따른 특성을 측정된 결과이다.

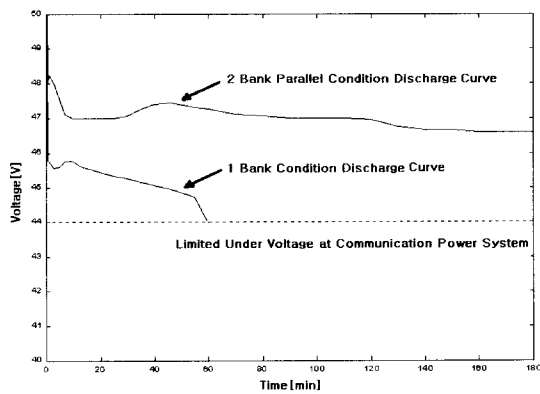


그림 2 축전지 방전특성 곡선
Fig. 2 Battery Discharge Characteristic Curve

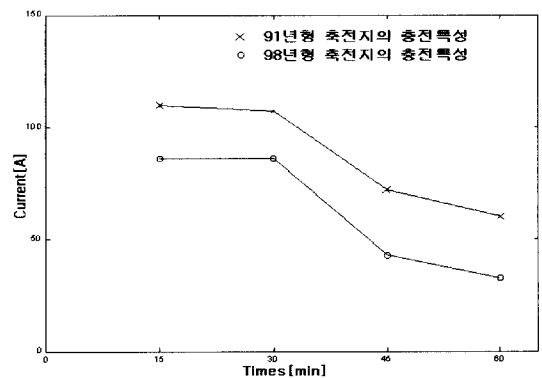
전력변환장치의 축전지와 접속되는 정류부 출력 즉, 전력변환부 입력전압과 시스템 출력 직류전압의 효율 관계는 다음과 같이 식 (11)로 나타낼 수 있다. 입력측 전압이 증가할수록 즉, 입력측 전력이 최대일 때, 최대 효율을 얻을 수 있다.^[8]

$$\eta_{MAX} = \frac{P_o}{P_{\in(max)}} = \frac{V_o I_o}{V_{dc(max)} I_o} = \frac{V_o}{V_{dc(max)}} \tag{11}$$

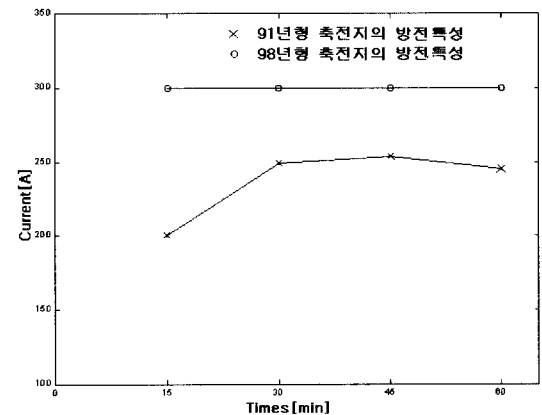
그러므로 축전지의 병렬운전은 입력측 전압강하를 억제하고, 이는 전력변환기의 효율을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 따라서 전지를 병렬로 사용하면 일정시간에 대한 전압강하를 지연시킬 수 있다. 그러나 전지

의 경년변화에 따른 전지의 내부저항을 고려하지 않은 상태로 병렬운용하고 있으며, 그 결과 다음 그림 3, 4와 같은 사례를 통하여 충방전시 전류의 불평형상태가 있음을 알 수 있었다. 신·구 축전지가 병렬연결된 상태에서 방전시에는 내부저항이 낮은 새 축전지가 많은 전류부담을 갖게되고, 정전으로 방전을 적게 하였으나 전위차 발생이 심한 오래된 축전지가 충전시에 많은 충전전류가 흐르게되어 열화의 진행을 촉진하게 된다.

충전전류의 변화는 그림 (a)와 같이 91년형 축전지에 높은 전류가 흐르게 되고 방전전류의 변화는 (b)와 같이 98년형(신형)에서 높은 전류가 분담되는 것을 알 수 있다.



(a)

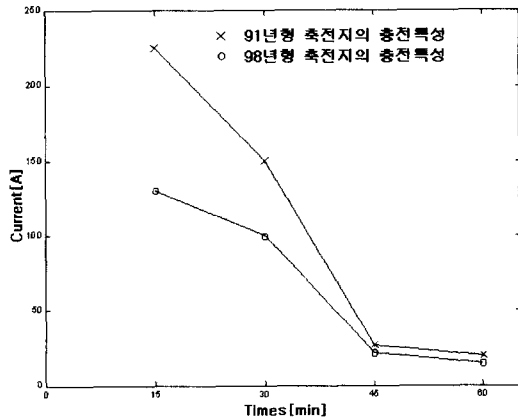


(b)

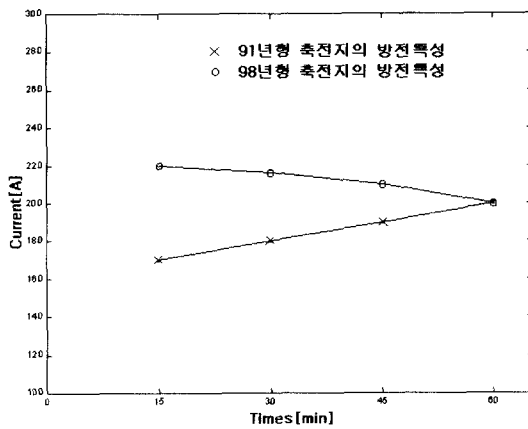
그림 3 시스템1의 충방전시 불평형 전류
(a) 충전시 불평형전류 (b) 방전시 불평형전류

Fig. 3 Unbalance current of system 1 at charge & discharge

(a) Unbalance current at charge
(b) Unbalance current at discharge



(a)



(b)

그림 4 시스템 2의 충·방전시 불평형 전류
 (a) 충전시 불평형전류 (b) 방전시 불평형전류
 Fig. 4 Unbalance current of system 2 at charge & discharge
 (a) Unbalance current at charge
 (b) Unbalance current at discharge

2.3 축전지 내부저항

축전지를 건전지와 비교하였을 때, 다른점은 충전을 할 수 있다는 것 외에 내부저항이 낮아서 필요한 짧은 시간에 큰 전류를 내보낼 수 있다는 점이다. 전지내부 저항은 전지의 극판 대향면적, 극판간 거리, 전해액의 성질, 온도 등에 따라서 달라진다. 납 축전지의 고율방전에서는 고유 내부저항이 방전전압과 용량에 큰 영향을 주게된다. 전지의 내부저항은 일반적으로 전지용량에 반비례한다. 단 전지의 직렬수량, 즉 전압에 비례하면서 큰 전류가 흐르는 경우의 전압강하를 비교하여, 내부저항 Ω , 용량Ah, 전압 V에서, $\Omega \cdot Ah/V$ 가 적은 것만큼 좋은 것이다. 실제방전 시(DOD 50%)의 $\Omega \cdot$

Ah/V는 전지에 있어서 큰 차이는 없다. 내부저항, 방전전류와 전압의 관계, 온도특성을 고려한 기기의 방전종지전압과 사용시간(전지용량)과의 관계가 전지선택의 판단자료가 된다. 축전지의 수명은 여러 복합요소가 있으나 용량감소 원인은 극판 용량저하와 내부저항의 상승이 주요원인이 된다. 전지의 수명은 일반적으로 초기용량의 60~80%에 도달하면 전지의 수명이 다한 것으로 본다. 또한 축전지의 가능한 총방전 사이클은 방전심도에 따라 다르게 나타난다.^[6]

방전심도는 축전지의 방전상태를 나타내는 수치로서 일반적으로 정격용량에 대한 방전량의 비율(방전용량/전지용량)로서 나타낸다. 그림 5에서와 같이 방전심도 50%에서 6년이지만 100% 방전이 이루어지면 2년에 불과하여 전지 수명이 1/3으로 감소하게 된다.

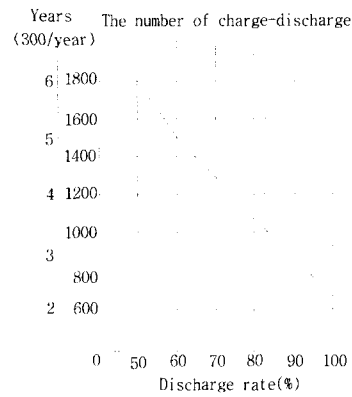


그림 5 방전심도와 수명
 Fig. 5 Discharge rate and lifetime

전지내부저항에 대한 기준은 IEC(International Engineering Commission)의 고정 납 축전지에 대한 내부저항 측정방법을 권고하고 있으며 그림 6은 납 축전지의 내부저항을 나타낸다.

2.4 내부저항 계산방법

전지의 내부저항을 구하기 위해서 $V=f(I)$ 관계를 다음과 같은 방법으로 결정한다. 충전된 전지 3개를 $25 \pm 2[^\circ C]$ 에서 두 점을 결정한다. 첫 번째 점은 전류 $I_1 = I_{10} \pm 10\% [A]$ 로 20초 방전 후 전압·전류를 측정한다. 재충전 없이 2~5분이 지난 후 두 번째 점을 결정한다. 두 번째 점은 전류 $I_2 = 3I_{10} \pm 10\% [A]$ 로 5초 방전 후 전압·전류를 측정한다. 다음 식 (12)에 의해서 내부저항을 계산한다.

$$R_i = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} [\Omega] \tag{12}$$

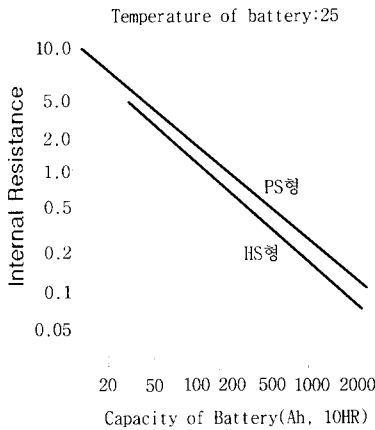


그림 6 납 축전지 내부저항
Fig. 6 Internal resistance of lead-acid battery^[4]

그림 7은 내부저항 측정회로와 내부저항을 결정하는 그래프를 나타낸다.^[7]

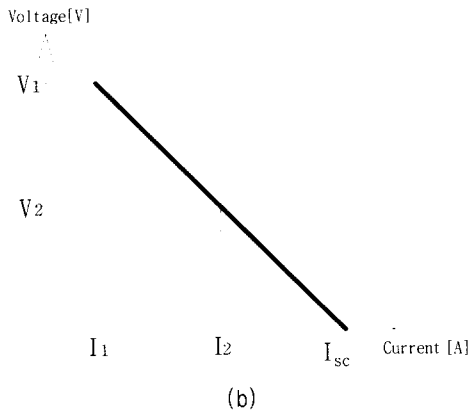
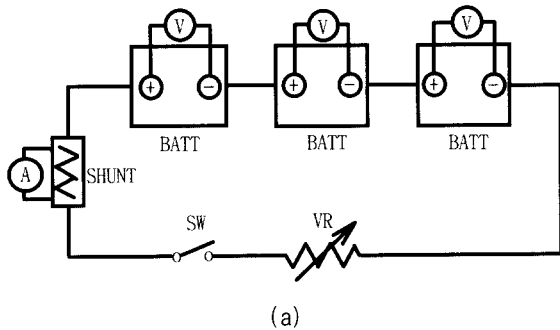


그림 7 (a) 내부저항 측정회로
(b) 내부저항 결정
Fig. 7 (a) Measuring circuit of internal resistance
(b) Decision of internal resistance

내부저항 r 은 경년 변화에 따라 증가하고, 사용 중에는 만충전 때에 가장 낮고, 방전상태가 되면 내부저항이 높아지게 된다. 전지의 직렬연결 시에 전류관계식은 다음과 같다.

$$I = \frac{sE}{sr + R} \quad [A] \quad (13)$$

여기서 s : 직렬(Series) 전지 수
 R : 회로내의 부하저항 $[\Omega]$

전지의 병렬연결 시에 전류관계식은 다음과 같다.

$$I = \frac{E}{(r/p) + R} \quad [A] \quad (14)$$

여기서 p = 병렬(Parallel) 전지 수

직·병렬연결 시에는 직렬연결 된 전지의 각각 내부저항의 합과 병렬연결의 가지수로 나눈 값으로 나타내며, 전류관계식은 다음과 같다.

$$I_{SP} = \frac{sE}{(sr/p) + R} \quad [A] \quad (15)$$

여기서 s : 직렬(Series) 전지 수
 p : 병렬(Parallel) 전지 수^[3]

2.5 불평형전류감소 알고리즘

축전지의 병렬운전 시에 불평형 전류의 원인이 되는 내부저항 차를 감소시키기 위해서 그림 8과 같은 방식을 제안하였다.

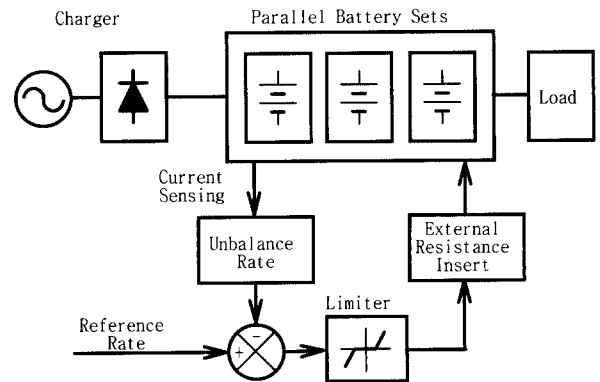


그림 8 제안된 불평형 전류 제어
Fig. 8 Proposed unbalance current control

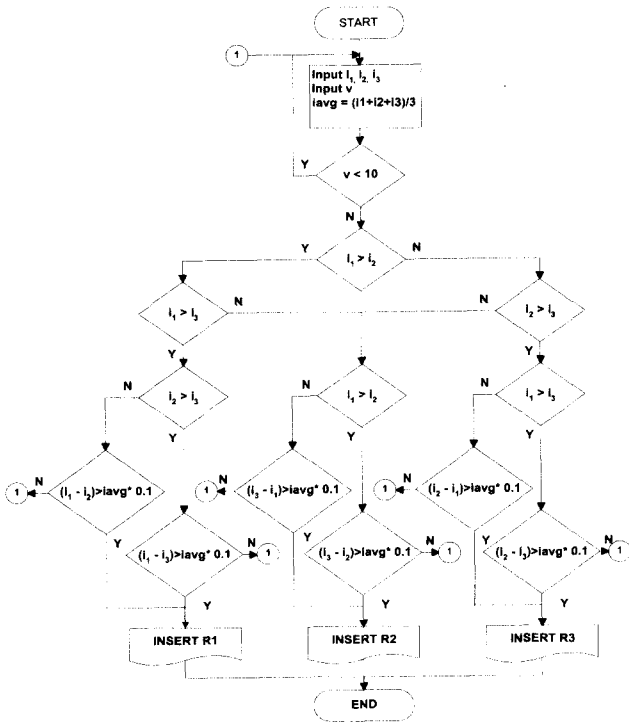


그림 9 제어 알고리즘
Fig. 9 Control algorithm

신·구 축전지의 내부저항 차에 의해서 충전과 방전시에 발생하는 불평형 전류를 검출하고 불평형률이 기준치 이상이 되면 외부에서 저항을 첨가시켜서 내부저항 차를 줄이게 된다. 이때 외부 저항 값은 수십[mΩ]으로 손실의 영향이 적다.

그림 9는 3조의 병렬연결 시에 적용되는 제어알고리즘을 나타낸다. 우선 단자전압을 측정하여 일정 값 이하 일 경우에는 제어알고리즘을 차단하는 무한루프를 실행시킨다. 그렇지 않을 경우 각 조의 전류를 측정하고, 평균값과 최대전류와 최소전류를 구하여 불평형률을 계산한다. 불평형률을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Unbalance Rate} = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{I_{\text{avg}}} \times 100 \quad (16)$$

불평형률이 10[%] 이상이 되면 축전지의 내부저항이 작은쪽에 외부저항을 첨가시켜 불평형률을 감소하도록 프로그래밍하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험장치

사용기간이 다른 축전지(12[V] 64[AH]) 3조를 각각

병렬 연결하여 구성하였다. 1조는 새로운 축전지로 구성하고 나머지 2개 조는 사용기간이 오래된 축전지를 사용하였다. 전체회로는 그림 10과 같이 축전지조, 충전부, 전류·전압 센싱부, 마이크로 프로세서 제어부, 스위치 및 저항블럭, 가변부하장치로 구성되어 있다.

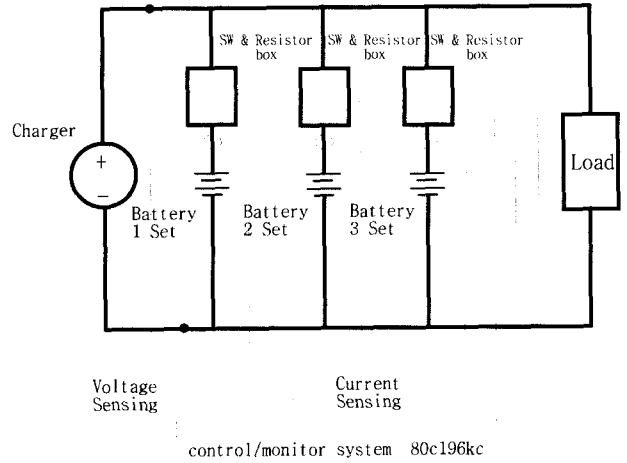


그림 10 시스템 구성
Fig. 10 System arrangement

그림 10에서 스위치 및 저항블럭(block)은 그림 11에 나타난 것과 같이 저항(0.05[Ω] 150[W]) 3개와 스위치 2개로 구성되어 있다. 저항 값을 선정하기 위해서 축전지 내부저항을 서술한 방법으로 측정하고 보상 가능한 값을 선정하였다. 초기상태에서 모든 스위치는 닫힌 상태로 되어 있고 3개의 저항이 병렬 연결되어 전체 저항 값은 가장 작은 값을 나타낸다. 불평형률을 감소시키기 위해서 외부저항을 첨가 할 때는 스위치를 개방시켜 전체 저항 값을 증가시킨다. 그림 12는 실제 실험장치를 나타낸다.

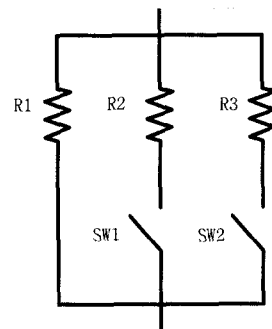


그림 11 스위치 및 저항블럭
Fig. 11 Switch & Resistance Block

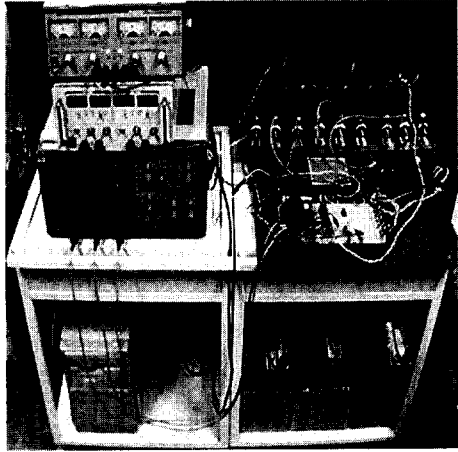


그림 12 실험장치 사진
Fig. 12 Experiment equipment picture

3.2 실험결과 및 고찰

가변부하장치를 사용하여 부하는 5, 10, 15, 20, 25, 30[A]에서 실험되었다. 방전 시에 신 축전지에서 많은 전류가 흐르므로 불평형 현상이 보상 전에 발생함을 알 수 있다. 불평형률은 보상전에 20~60[%]였지만 외부저항을 첨가시켜 보상 후에는 5~30[%]로 감소함을 알 수 있다. 그림 13~18은 보상전, 후의 전류파형을 나타내며 부하가 증가할수록 불평형률이 증가함을 알 수 있다.

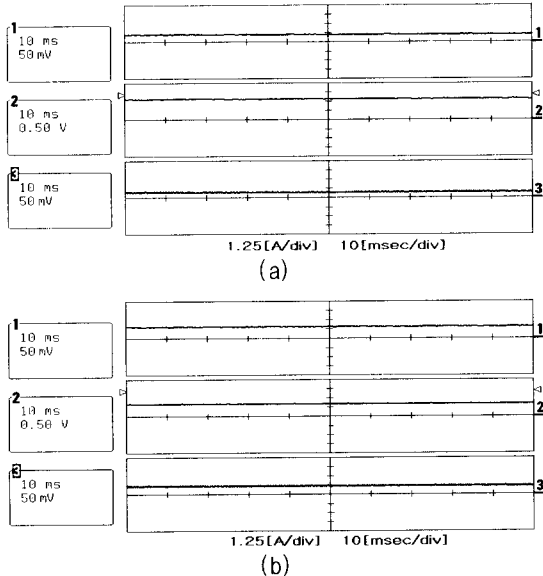


그림 13 부하전류 5[A] (a) 보상전 (b) 보상후
Fig. 13 Load current 5[A] (a) Before compensation (b) After compensation

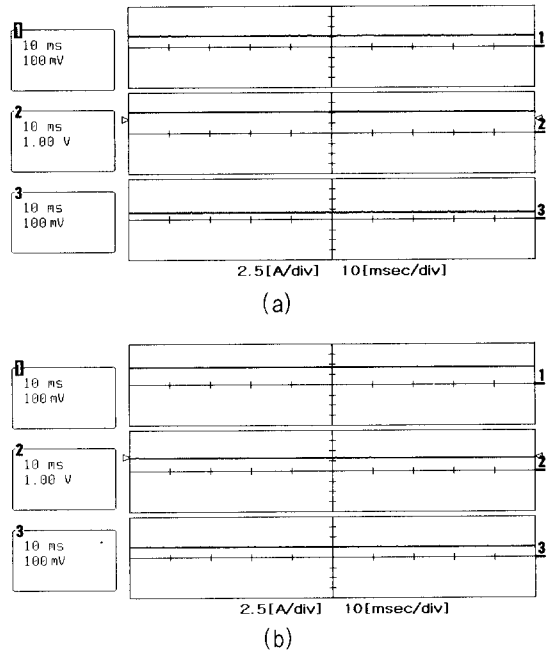


그림 14 부하전류 10[A] (a) 보상전 (b) 보상후
Fig. 14 Load current 10[A] (a) Before compensation (b) After compensation

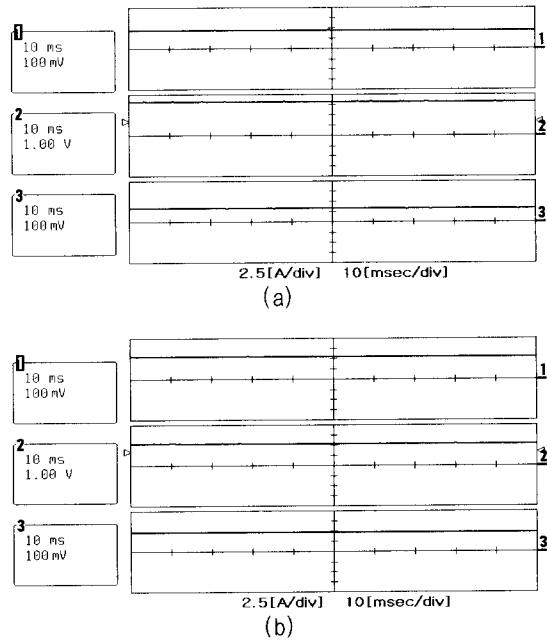
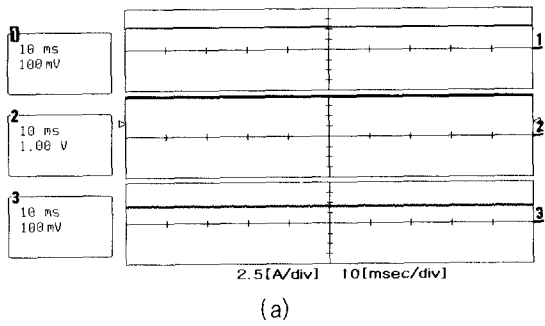
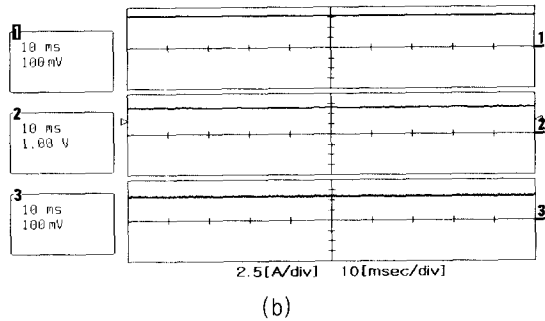


그림 15 부하전류 15[A] (a) 보상전 (b) 보상후
Fig. 15 Load current 15[A] (a) Before compensation (b) After compensation

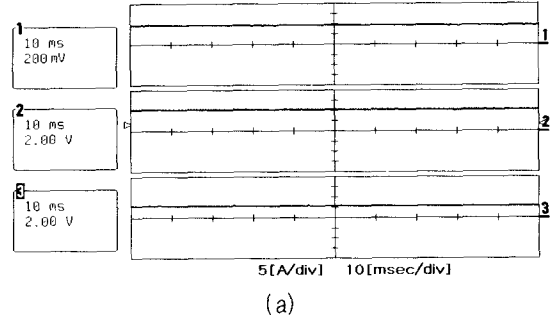


(a)

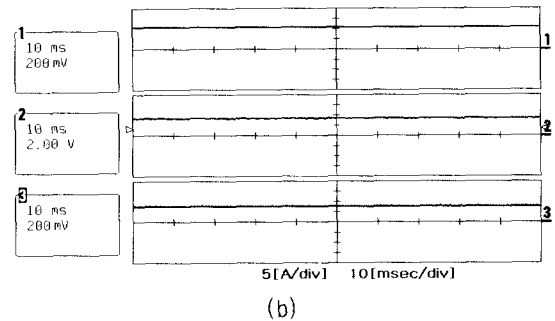


(b)

그림 16 부하전류 20[A] (a) 보상전 (b) 보상후
Fig. 16 Load current 20[A] (a) Before compensation (b) After compensation

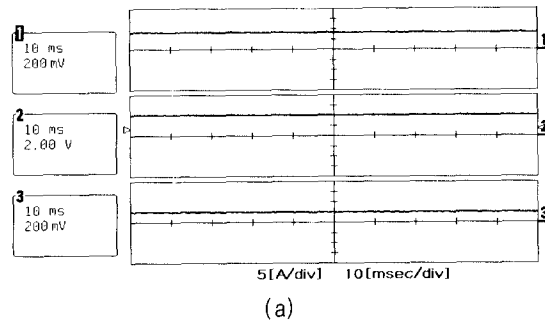


(a)

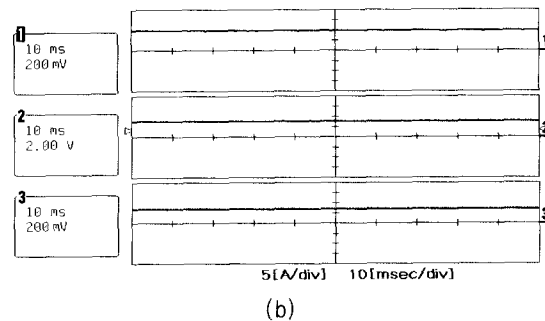


(b)

그림 18 부하전류 30[A] (a) 보상전 (b) 보상후
Fig. 18 Load current 30[A] (a) Before compensation (b) After compensation



(a)



(b)

그림 17 부하전류 25[A] (a) 보상전 (b) 보상후
Fig. 17 Load current 25[A] (a) Before compensation (b) After compensation

4. 결 론

본 논문에서는 축전지의 특성에 관하여 서술하였고, 기본 원리와 전기적인 등가회로를 통하여 축전지의 운용시에 병렬운전의 필요성을 부각시켰다. 이때 발생하는 신·구 축전지사이의 불평형 전류는 축전지의 수명과 열화에 큰 영향을 주게된다. 불평형 전류의 원인은 신·구 축전지 내부저항이 서로 다르기 때문에 발생하며 저항차이를 줄이는 방법으로 외부에서 보상저항을 첨가시키는 방식을 제안하였다. 마이크로 프로세서에 의해 각 조의 전류를 측정하고 불평형률을 계산하여 일정값 이상이 되면 저항을 증가시키는 알고리즘을 프로그래밍 하였고 실험을 통하여 구현하였다. 실험결과 부하에 따라 보상전의 불평형률이 20~60[%] 이며, 이를 보상 후에는 5~30[%] 로 감소함을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 축전지의 병렬운전 시에도 수명을 연장시키는 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 향후에는 용량에 따른 보상저항의 체계적인 계산과 실제 시스템에 적용할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. H. Kim and S. Y. Kang, "Time-Sharing Charge Equalization for Series Connected Battery strings", Proceedings ICPE'95, pp. 331-336, 1995.
- [2] H. S. Ban, C. H. Kwak, H. S. Mok and G. H. Choe, "Unbalance Load Current at Operating in Parallel of Lead Acid Batteries Connection Condition", KIFE Power Electronics Annual Conference, pp. 210-213, July, 1999.
- [3] G. W. Vinal, Storage Batteries. New York: John Wiley & Sons, April, 1954.
- [4] T. R. Crompton, Battery Reference Book. Society of Automotive Engineers Inc., pp. 3/3-3/5. 50/3-50/34 1997.
- [5] N. Akiyosi, The Basic of Battery. CQ pub., July, 1996.
- [6] Nippon Battery Co. Ltd , Practical Secondary Battery. Daily of Science Magazine, April, 1998.
- [7] IEC 896, Stationary lead-acid batteries. 1995.
- [8] Simon S. Ang "Power-Switching Converter" Marcel Dekker, Inc. pp. 2-11

저 자 소 개



반한식(潘漢植)

1952년 1월 29일생. 1984년 건국대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(석사). 2001년 동 대학원 박사과정 수료. 1982년~1999년 한국통신 근무. 현재 하나로통신 산업개발(주) 통신부대설비팀장.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공학박사). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 Post-Doc. 1998년~1999년 미국 버지니아 주립대 교환방문교수. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 2001년 현재 건국대학교 전기공학과 교수 및 전력전자신기술연구센터 소장. 당 학회 부회장.