

방전 전류를 이용한 스마트폰 컷오프 전압 동적 제어 시스템

고민영*, 백성우*, 최용훈°

Smartphone Cutoff Voltage Dynamic Control System Using Discharge Current

Min-young Go*, Sung-Woo Baek*,
 Young-hun Choi°

요약

스마트폰의 가용 시간을 늘리기 위해 다방면의 노력이 있었지만, 배터리를 효율적으로 사용하는 연구는 거의 진행되지 않았다. 특히 시스템이 종료되는 컷오프 전압은 방전 전류를 고려하지 않고 정해져 있다. 우리는 별도의 하드웨어 추가 없이 배터리의 컷오프 전압을 방전 전류에 따라 동적으로 변환할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이를 바탕으로 높은 방전 전류에서 컷오프 전압을 낮춰서 스마트폰을 최대 18.9% 더 사용할 수 있도록 하였다.

Key Words : Smartphone, Android, Battery, Ir-drop, cutoff voltage

ABSTRACT

There have been many efforts to increase the time available for smartphones, but research on the efficient use of batteries has not been conducted. In particular, the cutoff voltage at which the system is shut down is determined without considering the discharge current. We have built a system that can dynamically control the cutoff voltage of a battery without adding any additional hardware. Based on this, we lowered the cutoff voltage at high discharge currents so that the smartphone can be used up to

18.9% more.

1. 서론

스마트폰의 가용 시간은 중요한 문제이다. 갤럭시 S부터 갤럭시 S8까지 스마트폰의 성능은 15배 이상 증가한 반면, 배터리 용량은 겨우 두 배 증가하였다. 따라서 구글에서는 Doze, AppStandby 등 전력 절감을 위한 여러 시스템들을 추가하였고, 많은 연구들이 모바일 디바이스의 가용 시간을 늘리기 위한 SW적인 시도를 하고 있다. 하지만 배터리의 특성을 고려한 시스템 연구는 거의 되지 않고 있다.

배터리의 특성을 고려하는 것이 중요한 이유는 현재 안드로이드 시스템에서는 배터리의 가용용량을 충분히 사용하지 못하기 때문이다. 구글의 레퍼런스폰인 넥서스 5x는 2700mAh 용량의 배터리를 갖고 있지만 current-base 방법^[1]을 이용하여 배터리의 가용 용량을 측정하였을 때, 최대 가용 용량은 2249mAh이다. 하지만 전류를 0.5C(Coulomb)로 방전할 경우 배터리의 최대 가용 용량의 87%인 1961mAh 밖에 사용하지 못한다. 왜 이런 현상이 발생하는 것일까?

스마트폰은 배터리의 전압이 컷오프(cutoff) 이하로 낮아지면 스마트폰을 종료한다. 컷오프 전압 이하에서는 스마트폰이 정상적으로 동작하지 않은 가능성이 있기 때문이다. 하지만 컷오프 전압에 다르더라도 배터리에는 사용 가능한 에너지가 남아있다. 이러한 배터리 잔량은 전압 강하로 인해 방전 전류에 따라 달라진다. 그림 1은 전압 강하에 대한 그림이다. 그림에

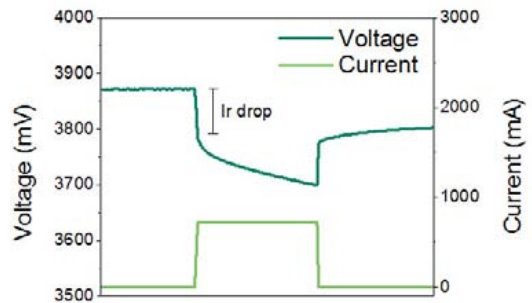


그림 1. 방전 시 배터리의 전압 강하
 Fig. 1. Ir drop of battery when discharging

* First Author : (ORCID:0000-0002-2734-7763)Yonsei University Department of Computer Science, mygo@yonsei.ac.kr, 학생회원
 ° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-9682-9782)Yonsei University Department of Computer Science, cyh0967@yonsei.ac.kr, 학생회원
 * (ORCID:0000-0002-8195-031X)Yonsei University Department of Computer Science, swbaek@mobed.yonsei.ac.kr, 학생회원
 논문번호 : KICS2017-12-376, Received December 4, 2017; Revised January 5, 2018; Accepted February 20, 2018

서 보이는 바와 같이 전류가 커지면, 배터리의 전압이 떨어진다. 따라서 방전 전류가 커지면, 일찍 컷오프 전압에 다다르고, 그만큼 가용 용량이 줄어든다. 그림 2는 maccor를 통해 방전 전류와 배터리 사용량과의 관계를 측정한 그래프이다. 방전 전류가 0.1C로 낮은 경우에는 전압 강하가 적게 발생하여 컷오프 전압에 다다르기까지 사용할 수 있는 에너지가 많다. 따라서 최대 가용 용량을 거의 전부 활용할 수 있다. 반면에 방전 전류가 0.9C로 높은 경우에는 전압 강하가 많이 발생하여 컷오프 전압까지 사용가능한 에너지가 최대 가용 용량 대비 2/3 이하로 낮아진다.

높은 전류에서 사용되지 못하는 에너지를 활용하기 위해서는 컷오프 전압에 대해 이해할 필요가 있다. 스마트폰은 컷오프 전압보다 낮은 전압에서도 정상적으로 동작한다. 예를 들어서 컷오프 전압이 3.5V라고 하여도 실제로 H/W는 대략 3.0V까지는 정상 작동이 보장된다. 그러나 무턱대고 컷오프 전압을 낮추기에는 앞서 말한 전압 강하가 문제가 된다. 스마트폰에서 0.1C 내외의 가벼운 workload를 이용하다가 갑작스레 0.5C가 넘는 workload를 구동한다면, 높아진 전류로 인해 전압은 낮아지게 된다. 만약 컷오프 전압이 3.5V라면 이처럼 급작스러운 전압 강하 상황에서 H/W가 동작 가능한 3.0V까지 전압이 내려가지는 않겠지만, 컷오프 전압을 낮춰서 사용하던 컷오프 갑작스럽게 스마트폰이 종료될 수 있다. 따라서 컷오프 전압 이하에서도 스마트폰은 구동되지만, 전압 강하에 대한 고려가 필요하다.

우리는 스마트폰의 전류에 따라 배터리의 전압 강하가 얼마나 발생하는지를 모델링하여, 컷오프 전압 이하에서도 안정적으로 스마트폰을 사용할 수 있는

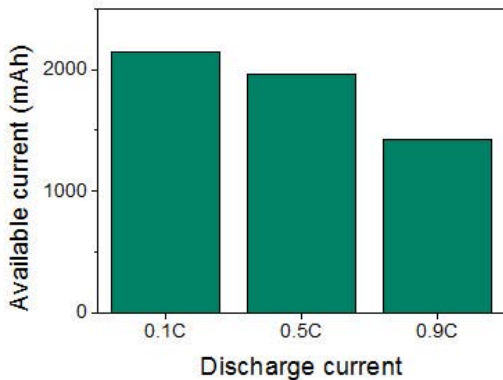


그림 2. 방전 전류에 따른 배터리 가용 용량
Fig. 2. Available capacity of battery according to discharging current

시스템을 개발하였다. 이러한 시스템을 위해서 첫째로 실험적으로 스마트폰의 H/W의 정상 작동이 보장되지 않는 전압을 규명하고, 둘째로 전류에 따른 전압 강하를 모델링하였으며, 마지막으로 커널에서 안드로이드에서 소모하는 전력을 계산하였다.

II. 구 현

시스템 구현 및 배터리 특성에 대한 사전 실험은 모두 구글의 레퍼런스 기기인 nexus 5x를 기반으로 진행되었다. 현재 전류와 전압을 정밀하게 측정하기 위해서 그림 3과 같이 maxim社의 fuel gauge와 아두이노를 이용하여 배터리에서 측정되는 전류, 전압을 측정할 수 있는 H/W를 제작하여 실험을 진행하였다.



그림 3. (a) 스마트폰의 전류, 전압 측정을 위한 아두이노 (b) 배터리 테스트를 위한 maccor
Fig. 3. (a) Arduino for current and voltage measurement of smartphone (b) Maccor for battery testing

2.1 전압에 따른 H/W 안정성 측정

스마트폰의 사용 시간을 늘리기 위해서 컷오프 보다 낮은 전압에서 스마트폰을 동작시키더라도, 갑작스럽게 기기가 종료되는 등의 문제가 발생해서는 안 된다. 따라서 우리는 어느 수준의 전압까지 H/W가 안정적으로 작동하는지를 다양한 환경에서 실험하였다. 그림 4은 여러 시나리오 별로 기기가 언제 종료되는지

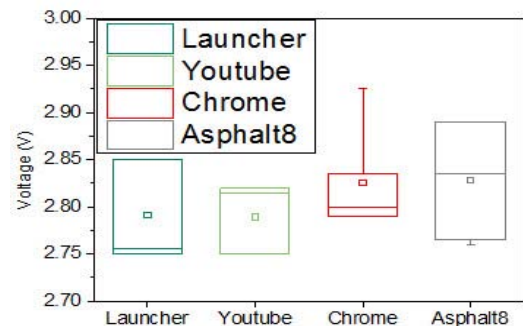


그림 4. 시나리오 별 비정상 종료 시 전압
Fig. 4. Voltage at abnormal termination by scenario

를 측정한 그래프이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 CCV 기준으로 전압이 2.95V 이상에서 기기가 비정상적으로 종료된 경우는 없었다. 따라서 전압 강하로 전압이 낮아지더라도 2.95V 이하로 전압이 떨어지지 않도록 정책을 세웠다.

2.2 전류에 따른 전압 강하 예측

갑작스런 방전 전류의 증가는 스마트폰의 비 정상 종료를 유발한다. 방전 전류의 증가로 전압 강하가 발생하더라도, 스마트폰의 비 정상 종료를 방지하기 위해서는 방전 전류가 최대로 증가하는 상황에서 전압이 컷오프 전압까지 강하가 되는지를 예측해야 한다. 전류에 따라 전압이 얼마나 떨어질지 예측하기 위해서는 전류와 전압간의 관계에 대해 모델링을 해야 한다. 모델링은 M. Chen의 논문^[2]에서 전압 강하를 예측하기 위해 사용한 회로 모델에 기반하여, 전압 강하만을 정확하게 예측할 수 있도록 회로 모델을 수정하여 사용하였다. M. Chen의 논문에서 이용한 회로 모델에 들어갈 인자를 추출하기 위해 maccor를 이용하였다. 넥서스 5x 배터리의 전류와 전압 간의 전압 강하를 모델링한 결과는 식 1과 같다.

$$I_{r-drop} = (0.1187 * \exp(-8.016 * SoC) + 0.6671) * I \quad (1)$$

식에서 SoC는 State-of-Charge의 약자로 현재 배터리의 잔량을 의미한다. 예를 들어서 가용 용량이 1000mAh인 배터리에서 300mAh가 방전되고 700mAh가 남았다면, SoC는 0.7이다. I는 방전 전류로 A단위로 입력된다. 현재 방전 전류가 500mA라면 I는 0.5이다. 식의 계산 결과로 전압이 강하되는 양이 V 단위로 제공된다.

2.3 기기가 소모하는 전력 계산

제안하는 시스템을 위해서는 스마트폰에서 소비하는 전류를 알아야 한다. 하지만 스마트폰의 배터리 관리 장치(fuelgauge)는 전류를 측정하지 않거나, 측정하는 경우에도 주기가 느린 경우가 많다. 넥서스 5x의 경우에는 30초 주기로 전력을 측정한다. 따라서 보다 정밀한 전력 측정을 위해 우리는 AppScope^[3]를 이용하여 소프트웨어적으로 시스템의 전력을 계산하였다. 우리는 해당 툴을 넥서스 5x 커널에 맞게 포팅하였으며, 해당 툴이 launcher, youtube, chrome, Asphalt8 앱에 대해 10% 이내의 MAPE를 가지도록 기기에 최적화된 파워 모델링을 수행하였다.

2.4 시스템 구성

시스템은 커널의 디바이스 드라이버 레벨에서 구현되었다. 매 초마다 AppScope를 이용하여 시스템이 소모하는 전류를 측정하면, 방전 전류에 따라 컷오프 전압을 결정한다.

전류에 따른 컷오프 전압을 결정하기 위해 다양한 시나리오에서 기기의 소모 전력을 측정해 본 결과 가장 무거운 워크로드는 Asphalt 8 자동차 경주 앱으로 최대 1500mA를 소모하였다. 따라서 최악의 경우 전류가 1500mA까지 사용된다라도, 전압 강하로 인해 전압이 2.95V 이하로 내려가지 않아야 한다. 우리는 모델을 사용하여 현재 방전 전류가 1500mA까지 증가할 경우에 2.95V 이하로 전압이 강하하지 않는 최소 전압을 찾았다. 이를 컷오프 전압으로 삼고, 100mA 단위로 측정하여 커널 내부의 lookup 테이블에 저장하였다. lookup 테이블은 현재 전류가 어느 범위일 때, 시스템의 안정적인 동작을 보장하는 컷오프 전압의 쌍으로 이뤄졌다.

III. 평가

우리는 구현한 시스템에서 기기의 화면만 켜 둔 상태(launcher), youtube 재생, chrome 웹 브라우저, asphalt8 레이싱 게임에 대해 각각 얼마만큼 사용 시간이 증가하였는지를 살펴보았다. 그림 5와 같이 launcher가 가장 소모하는 전류가 낮고, asphalt8이 가장 소모 전류가 높다. launcher는 앞으로 부하가 커질 가능성이 있기 때문에, 컷오프 전압을 보수적으로 높게 설정한다. 따라서 상대적으로 수명 이득이 많지 않다. 반면 asphalt8은 이미 부하가 높아서 추가적인 부하로 전압 강하가 발생할 가능성이 낮기 때문에 컷오프 전압을 낮게 설정한다. 따라서 기존 컷오프 전압 대비 낮아진 전압 만큼 수명 이득이 발생하였다.

IV. 관련 연구

전압 강하를 모델링하기 위한 연구는 오래전부터 이뤄져왔다. Chen의 연구는 전압 강하를 간단한 계산 방식으로 정확하게 예측할 수 있는 회로 모델을 제안하였다^[2]. 본 연구에서는 Chen의 방법을 활용하였다. Rakhmatov는 배터리의 특성을 고려하여 전압강하와 recovery effect 등 전압의 변동을 예측할 수 있는 식을 고안하였다^[4]. 하지만 Rakhmatov의 방법은 식이 복잡하고 모델링이 필요한 인자들이 많다. 또한 상대적으로 정확도가 낮기 때문에 채택하지 않았다.

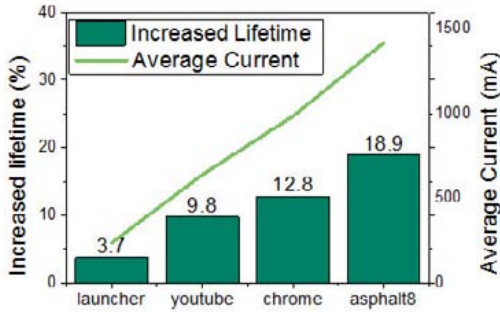


그림 5. 방전 전류에 따른 증가된 수명
Fig. 5. Increased lifetime due to discharge current

Newman은 배터리 내부의 전하의 이동을 수식화하여 아주 정확하게 배터리 전압의 변화를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다⁵⁾. 하지만 이 방법은 사전에 결정해야 할 인자가 너무 많기 때문에 실용성이 떨어진다.

모바일 기기, 특히 스마트폰에서 배터리의 특성을 고려하여 배터리의 가용 시간을 늘리는 연구는 여럿 있다. 백성우는 배터리의 recovery effect와 rate capacity effect를 고려하여 멀티배터리 상황에서 가용 용량을 늘리는 연구를 수행하였다⁶⁾. 다만 이 연구는 멀티배터리 상황을 전제하고 있기 때문에 현재 대부분의 스마트폰에서 사용하는 싱글배터리에는 적용할 수 없다. Liang은 네트워크 통신 상황에서 배터리의 recovery effect를 고려하여 스마트폰의 가용 시간을 증가시킬 수 있는 방법을 제시하였다⁷⁾. 하지만 이 연구는 스마트폰의 성능을 일부 제한하기 때문에 사용자 경험에 악영향을 줄 수 있다.

V. 결 론

우리는 스마트폰의 사용 전류에 따라 컷오프 전압을 동적으로 제어하여 작업량에 따라 최대 18.9%의 사용시간 증대 효과를 보였다. 특히 이러한 결과는 스마트폰에 별도로 고성능의 fuelgauge를 추가하지 않고도 얻어진 수치이다. 이는 상당히 효율적으로 스마트폰의 가용시간을 늘려줄 수 있는 시스템이다. 앞으로의 연구에서는 배터리의 노화, 온도 등 전류 외의 여러 특성을 반영하여 보다 효율적이고, 안정적인 동적 컷오프 전압 관리 시스템을 만들 것이다.

References

- [1] C.-H. Shin and J.-D. Cho, "Noble current-based method for gauging remainder of battery," *CICS*, pp. 389-390, 2007.
- [2] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, 2006.
- [3] C. Yoon, D. Kim, W. Jung, C. Kang, and H. Cha, "AppScope: Application energy metering framework for android smartphone using kernel activity monitoring," *USENIX ATC'12*, Boston, MA, USA, Jun. 2012.
- [4] D. Rakhmatov, "Battery voltage modeling for portable systems," *ACM TODAES*, vol. 14, no. 2, pp. 21-36, 2009.
- [5] J. Newman and W. Tiedemann, "Porous-electrode theory with battery applications," *AIChE J.* vol. 21, no. 1, pp. 25-41, 1975.
- [6] S. Baek, M. Go, S. Lee, and H. Cha, "Exploiting multi-cell battery for mobile devices: Design, management, and performance" *The 15th ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2017)*, Delft, The Netherlands, Nov. 2017.
- [7] L. He, et al., "Battery-aware mobile data service," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 6, pp. 1544-1558, Jun. 2017.