

IoT 센서노드 시스템을 위한 고출력 에너지 하베스팅 시스템⁺

(High Power Energy Harvesting Systems for IoT Sensor Nodes Systems)

김 용 석¹⁾, 박 용 수²⁾, 백 돈 규^{3)*}

(Yongseok Kim, Yong Su Park, and Donkyu Baek)

요 약 기존의 IoT 센서 노드는 배터리로부터 에너지를 공급받아 동작하는데, 넓게 분포되어 다양한 정보를 수집해야 하는 센서 노드의 특성상, 주기적으로 배터리를 새로 교체해야 하는 단점이 존재한다. 이 단점을 극복하기 위해 에너지 하베스팅 시스템을 통해 태양광이나 고온 증기 등으로부터 에너지를 수확할 수 있다. 하지만, 기존의 에너지 하베스팅 시스템은 공급전력이 상당히 제한적이기 때문에 통신과 같이 순간적으로 높은 전력을 요구하는 어플리케이션을 활용하기가 어렵다. 이 논문에서 우리가 제안하는 고출력 에너지 하베스팅 시스템은 기존 에너지 하베스팅의 단점을 보완한 Switch Control Unit을 설계하여 수확된 에너지양과 어플리케이션 동작 모드에 따라 수확된 에너지를 에너지 저장장치에 저장하거나 수확 및 저장된 에너지를 순간적으로 모두 어플리케이션에서 사용할 수 있도록 구상하였다. 제안한 시스템을 검증하기 위해 태양광을 기반으로 한 에너지 하베스팅 시스템을 구현하였으며 각각의 동작 모드에 따라 어플리케이션에 공급하는 전력량과 에너지 저장장치의 용량에 따른 최대 공급 시간을 확인하였다.

핵심주제어: 에너지 하베스팅, 고출력 시스템, IoT 시스템, Switch Control Unit

Abstract Existing IoT sensor nodes operate by receiving energy from a battery. But due to the characteristics of sensor nodes that are widely distributed for collecting various information, there is a disadvantage that the battery needs to be periodically replaced. In order to overcome this disadvantage, energy can be harvested from sunlight or high-temperature steam through an energy harvesting system. However, since the harvested power is quite limited, it is difficult to use applications that require instantaneous high power such as communication. We propose the design of the high-power energy harvesting system where a switch control unit compensates for the limited harvested energy with the energy storage device such as a capacitor. To verify the proposed system, an energy harvesting system based on sunlight was implemented, and we confirmed the maximum supply power to the application and the maximum supply time according to capacity of the energy storage device.

Keywords: Energy Harvesting, High Power System, IoT System, Switch Control Unit

* Corresponding Author: donkyu@cbnu.ac.kr

+ 이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2021) 지원을 받아 작성되었음

Manuscript received June 22, 2022 / revised August 10,

2022 / accepted August 18, 2022

1) 충북대학교 전자공학부, 제1저자

2) 충북대학교 전자공학부, 제2저자

3) 충북대학교 전자공학부, 교신저자

1. 서론

대부분의 Internet of Things (IoT)용 센서 노드를 활용하는 시스템은 데이터를 받아서 전송하는 과정을 가진다. 센서 노드에서 무선통신을 통해 메인서버 또는 라우터에 수집한 데이터를 전송하기 위해서는 데이터를 수집하는 과정에 비해 상대적으로 높은 출력 에너지가 필요하기 때문에 배터리와 같은 에너지 저장장치를 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 에너지 저장장치를 사용하는 것은 사용주기에 따라 교체하는 등의 관리가 어려우며 용량에 따라 크기가 증가하고 비용이 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 에너지 하베스팅 시스템을 이용하여 에너지 저장장치를 사용하지 않고 에너지를 공급할 수 있는 시스템을 구현하는 것이 하나의 대안이 될 수 있다. 하지만, 센서 노드를 활용한 에너지 하베스팅 시스템은 많은 전력을 필요로 하는 무선통신 등의 과정에서 어려움이 있어 활용범위가 상당히 제한적이다. 그리고 에너지 하베스팅은 환경이나 변환할 에너지에 따라 전력이 일정하게 공급되지 않기 때문에 시스템의 동작이 불안정하다.

따라서 우리는 기존의 에너지 하베스팅 시스템의 한계를 극복하고자 배터리가 아닌 소형 캐패시터를 에너지 저장장치로 채택하여 별도의 배터리 교체문제나 크기 및 비용 문제로부터 자유로운 고효율 에너지 하베스팅 시스템을 제안한다. 수확된 에너지양과 에너지 저장장치의 충전량을 분석하여 수확 에너지에 따라 어플리케이션을 Active, Sleep, High Performance 모드로 나눠서 그에 따른 다양한 전력을 공급한다. 이때 새롭게 제안하는 Switch Control Unit을 활용하여 하베스팅 에너지와 에너지 저장장치에 충전된 에너지를 모드 별로 효과적으로 어플리케이션에 공급한다.

제안한 고효율 에너지 하베스팅 시스템은 작업의 연속성을 위하여 하베스팅 에너지에 따라 데이터의 보존 및 복원 과정을 포함한다. 수확 에너지가 어플리케이션의 동작 임계전압보다 작아지기 전에 미리 비휘발성 메모리 (Non-Volatile Memory, NVRAM)에 데이터를

저장시켜 데이터의 손실을 줄인다. 수확 에너지가 다시 임계전압보다 높아질 때 저장된 데이터를 다시 어플리케이션으로 송신하여 동작을 진행하도록 한다. 그리고 블루투스 모듈같이 고전력을 사용할 때 수확 에너지만으로 부족한 경우가 생길 수 있는데 이때 에너지 저장장치에 저장된 에너지를 같이 공급하여 고효율 시스템을 사용할 수 있도록 하였다.

본 논문 2장에서는 에너지 하베스팅 논문들에 대해 분석하고 한계점을 서술하였다. 3장은 고효율 에너지 하베스팅 시스템의 동작과 설계를 설명하였으며, 4장은 제안한 시스템을 검증하기 위한 시스템 환경설정 및 전류 측정을 통한 동작 검증 결과를 포함한다. 5장에서는 현재 연구 내용과 향후 연구 방향에 관해서 서술하였다.

2. 에너지 하베스팅 시스템

IoT 시스템은 최근 에너지 하베스팅을 활용하고 있다. 주변 환경에 있는 에너지를 통해 전기 에너지를 공급받고 이를 통해 디바이스의 수명과 자동화 동작의 시간을 연장하는데 목적을 두고 있다. 이에 따른 시스템의 면적과 비용 그리고 에너지관리를 중점적으로 연구가 이루어지고 있다.

Cong Wang et al.(2014)은 배터리나 대형 캐패시터와 Power Convertor 없이 시스템에 직접 전력을 공급하는 Maximum Power Point Tracking (MPPT)를 개발하였다. 일반적인 태양광 패널을 활용할 경우 일반적인 MPPT가 필요하다. 이에 따라 Maximum Power Point (MPP) 전류와 시스템 공급전류가 맞지 않는 현상이 발생한다. 따라서 이를 맞추기 위한 MPPT 충전장치와 DC-DC Convertor를 필요로 한다. 하지만 이 두 가지 장치는 PV 수확 시스템에서 가장 면적이 크고 무거운 요소들이다. 따라서 on-chip으로 시스템을 구성하기에는 어렵다. 그리고 배터리를 사용하기 때문에 시스템의 수명을 감소시키며 지속적으로 로드 스위치를 제어하여 MPPT같은 역할을 수행한다. 그리고 Photovoltaic (PV) 모듈의 전압을 일반적인

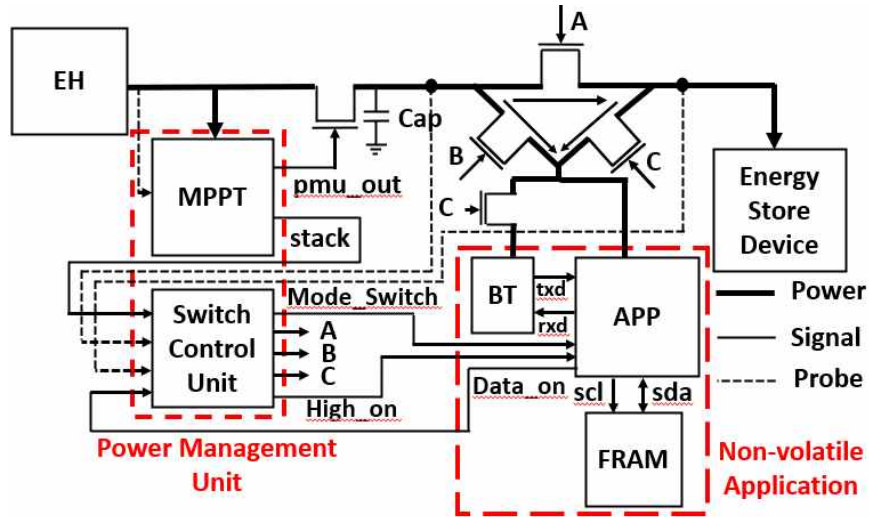


Fig. 1 System Configuration

Power Converter를 필요로 하지 않도록 한다. 또한 PV 모듈의 시간 상수가 사용 가능한 Dispersive Fade Margin (DFM)의 주기와 동기화될 수 있도록 Bulk 캐패시터를 PV셀과 병렬로 연결하고 부하 단에 반도체 장치의 전력 무결성을 유지하게 하는 디커플링 캐패시터를 연결한다. 하지만 임계치를 활용한 Power Management Unit (PMU)이기 때문에 전력사용의 효율성에 한계가 있다.

H Lee et al.(2015)은 Cong Wang et al.(2014)의 논문에서 사용된 PMU를 보완한 시스템을 제안하고 이를 IoT 시스템에 도입하였다. 제안한 PMU는 임계치를 이용하지 않고 Duty Cycle을 조절함으로써 설계한다. DFM의 오버헤드를 적절하게 제어하기 위해 고정 DFM 주파수를 사용하여 설계하였다. 이를 통해 Cong Wang et al.(2014)에서 설계된 PMU보다 8% 더 효율적으로 에너지를 시스템에 공급하였다.

위에서 언급한 PMU 시스템은 Power Converter와 배터리나 슈퍼 캐패시터를 활용하지 않는다. 따라서 면적 감소와 효율성을 증가시킬 수 있다. 하지만 배터리를 활용하지 않기 때문에 고출력 시스템으로써는 사용할 수 없다는 단점이 존재한다. 따라서 우리는 소형 캐패시터를 사용해 에너지 하베스팅을 활용한 고출력 IoT 시스템을 동작시킬 수 있는 전력관리 시스템을 제안한다.

3. 시스템 구성

Fig. 1은 제안한 시스템에 대해 보여준다. 에너지 하베스팅 소자(EH)에서 전력이 공급됨에 따라 전력관리장치(Power Management Unit)에서 최대 전력점을 추적 (MPPT)해서 측정된 전압이 최대 전력점보다 높을 경우에 전력을 통과시키도록 pmu_out을 출력시킨다. 그리고 전력의 추이에 대한 정보(Stack)를 Switch Control Unit으로 송신하여 에너지에 따라 Active, Sleep, High Performance로 동작할 수 있도록 한다. Switch Control Unit은 전력의 추이와 현재 전압에 대한 정보(Probe)를 바탕으로 APP의 동작을 결정한다. Mode_Switch를 이용해 APP의 동작을 제어하며 High Performance로 동작할 때는 APP의 결과 데이터가 저장되어 있을 때 동작하도록 하였다. 그리고 현재 전력이 얼마나 공급되고 Stack을 통해 에너지의 방향성을 판단하여 Switch A, B, C를 제어해서 에너지 하베스팅으로 공급받은 에너지를 어플리케이션에 직접 공급하거나 에너지 저장장치에 충전, 또는 고전력을 필요로 하는 Bluetooth (BT) 모듈을 동작시키기 위해 저장된 에너지와 수확 에너지를 동시에 공급한다.

한편, 비휘발성 어플리케이션 (Non-volatile Application)은 센서 노드를 통해 수신된 데이터

를 처리하여 결과 데이터를 출력시키는 동작을 실행하는 APP (Application process) 부분, 그리고 결과 데이터를 무선통신하는 BT 부분과 APP으로 수신되는 Mode_Switch를 통해 모드를 결정하고 Sleep 모드일 때 APP에서 측정된 데이터나 중요 레지스터의 데이터를 저장하고 Active 모드가 될 때 저장한 데이터를 송신하게 하는 비휘발성 메모리로 구성되어있다. 아래는 각 서브 모듈별로 상세 내용이 구성되어있다.

3.1 전력관리장치

1) MPPT

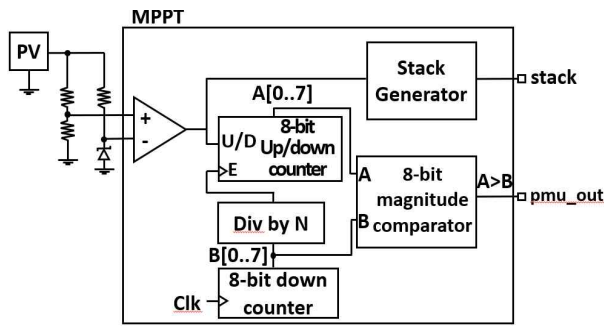


Fig. 2 MPPT Structure

MPPT는 Fig. 2와 같이 구성되어 있다(H Lee et al.(2015)). 에너지 하베스팅 소자를 통해 들어오는 전압과 Zener Diode를 통해 원하는 전압을 비교해서 비교기에서 나오는 출력에 따라 up/down counter의 출력이 상승할지 감소할지 결정한다. 8-bit down counter 출력과 8-bit up/down counter 출력은 8-bit magnitude comparator에서 비교하여 어플리케이션에 전원을 공급하는 스위치 입력인 pmu_out을 출력시킨다. 그리고 비교기 출력을 바탕으로 Stack Generator에서 전압에 따른 Stack을 출력시켜 이를 통해 비휘발성 어플리케이션 동작을 결정하도록 한다.

2) Switch Control Unit

Table 1은 Switch Control Unit의 동작을 설명하고 있다. Switch Control Unit은 Stack을

입력으로 받아 현재 에너지 하베스팅의 공급 전압을 파악하고, Probe를 통해 현재 전력을 파악한다. 파악한 데이터를 바탕으로 어플리케이션의 동작(APP mode)을 결정짓는 Mode_Switch 값을 출력하고, 비휘발성 어플리케이션과 에너지 저장 장치 (ESD)의 에너지 공급을 결정하는 Switch A, B, C를 제어한다.

Table 1 Switch Control Unit Operation

APP Mode	Switch Control			Operation
	A	B	C	
Sleep	High	Low	Low	ESD: Charge APP: Cut-off
Active	High	High	Low	ESD: Charge APP: Supply
High	Low	High	High	ESD: Charge APP: Supply

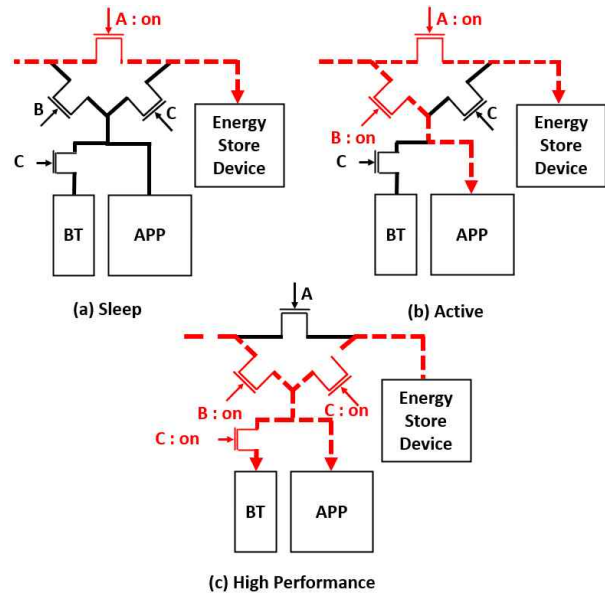


Fig. 3 APP and Energy Storage Device Operation according to Switch Control

에너지 하베스팅을 통해 공급되는 전압을 통해 APP이 사용하기에 부족한 전력일 경우 Sleep 모드로 동작하여 Fig. 3(a)과 같이 Switch A를 켜서 전력을 에너지 저장장치로 충

전시커 전력 소모를 최소한으로 한다. Mode_Switch에 의하여 비휘발성 어플리케이션은 Inter-Integrated Circuit (I2C) 통신을 통해 APP의 데이터와 필요한 레지스터의 데이터를 비휘발성 메모리로 송신한다. 전력이 동작 가능한 범위에 들어오면 Active 모드로 Fig. 3(b)과 같이 Switch A, B가 동시에 켜지면서 전력을 APP으로 공급하면서 나머지 전력을 에너지 저장장치에 전력을 공급한다. 비휘발성 메모리에 저장되었던 데이터는 APP으로 전송하여 중단된 작업을 이어서 진행한다. 만약 고출력 에너지가 필요한 동작을 실행할 때(에너지 하베스팅에서 공급하는 에너지가 부족하고 에너지 저장장치의 에너지가 충분한 경우) High Performance로 동작하도록 하는 Mode_Switch 값을 APP로 전송한다. 이때 데이터 레지스터에 데이터가 저장되었을 때 Data_on을 High (Logic 1)로 SCU에 전송하고 SCU는 High_on 신호를 High로 APP으로 전송함과 동시에 Fig. 3(c)과 같이 Switch B, C를 켜서 에너지 저장장치와 에너지 하베스팅의 전력을 동시에 공급하는 High Performance 모드를 실행한다.

3.2 비휘발성 어플리케이션

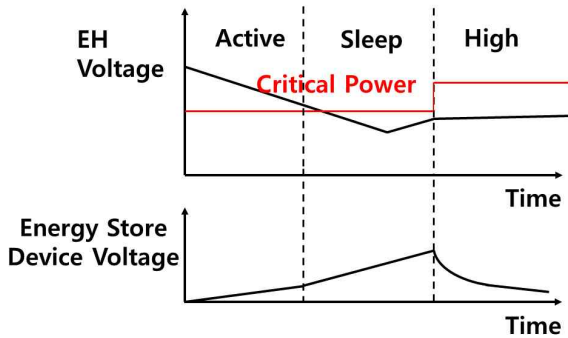


Fig. 4 APP operation according to energy harvesting supply voltage

Fig. 4는 에너지 하베스팅의 공급 전압에 따른 APP 동작에 대한 그래프이다. 임계전력은 APP와 BT 모듈이 동작할 수 있는 최소한의 전력량이다. 에너지 하베스팅의 공급 전압이 임계전압보다 클 때 Active 모드로 APP이 동작하게 된다. 이때 APP으로 공급되고 남은 에너지를

에너지 저장장치에 저장한다. 하지만 에너지 하베스팅의 공급 전압이 감소하게 되면 이것을 Probe 와 Stack을 통해 인지하고 임계전압 이하로 떨어지기 전에 미리 Sleep 모드로 동작시켜 현재의 데이터를 저장하여 APP의 동작이 정지하기 전에 비휘발성 메모리에 데이터를 저장시킨다. 그리고 Sleep 모드일 때 수확 에너지를 에너지 저장장치에 저장한다. 그리고 BT모듈을 이용하여 무선통신을 실행하게 되는 경우 BT모듈에 전력을 공급하게 되고 비휘발성 어플리케이션의 사용되는 전력이 증가함에 따라 수확 에너지만으로 전력을 충족하지 못하게 될 수 있다. 이때 에너지 저장장치에 충전된 에너지를 동시에 공급함으로써 고전력을 일정한 시간 동안 유지 시켜주는 High Performance 모드로 APP이 동작한다.

4. 동작검증

4.1 검증 환경 설정

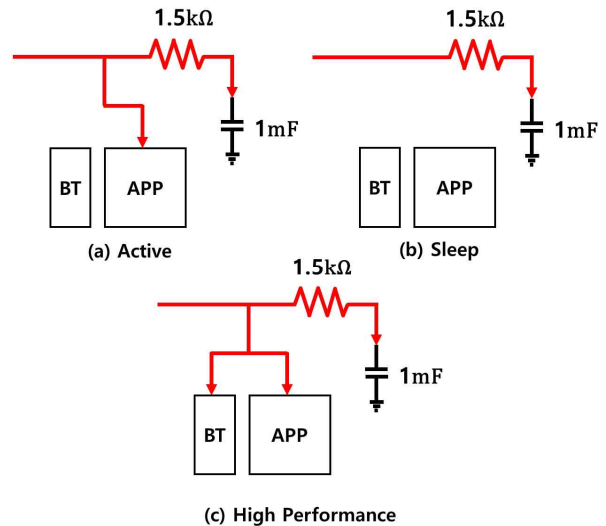


Fig. 5 Switch System implementation

Fig. 5는 모드에 따른 스위치 시스템을 구현하였다. APP은 Xilinx 사의 Spartan 6 개발 보드를 사용하였으며 개발 보드의 제원은 Table 2에서 보여준다. BT 모듈은 HC-06을 사용하였

으며 HC-06의 제원은 Table 3에서 보여준다. 수확 에너지는 전원 공급기를 사용하였다. Active 모드는 에너지 하베스팅 전압은 4.6v이고 전류는 60mA로 공급된다. 이때 APP를 동작시킬 수 있는 최소 전력을 넘은 상태이다. APP과 에너지 저장장치에 동시에 에너지가 공급됨에 따라 APP 내부 저항이 에너지 저장장치의 내부 저항보다 크게 될 때 전류가 에너지 저장장치로 대부분 공급되는 현상이 생긴다. 따라서 에너지 저장장치의 입력단에 1.5kΩ의 저항을 달아줌으로써 공급되는 전력의 90%을 APP으로 공급시키고 잔여 에너지를 에너지 저장장치로 저장하였다. Sleep 모드는 수확 에너지가 APP의 최소 전력을 넘지 못한 상태일 때는 APP를 동작시킬 수 없다. 이때 APP에 공급되는 스위치를 차단하고 에너지 저장장치에 공급시킨다. Cap으로 공급되는 전압을 통해 전력의 공급량을 확인한다. High Performance 모드는 블루투스 통신을 위한 블루투스 모듈과 APP에 동시에 전력을 공급시킨다. 블루투스 모듈에서 사용되는 최소 전압이 4.6v, 전류가 40mA이다. APP의 최소 전압은 4.5v이고 전류는 60mA이기 때문에 에너지 하베스팅 전압이 4.6v이며 전류는 60mA를 공급하는 경우 APP과 블루투스 모듈 동시에 전력을 공급하는 것이 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위하여 에너지 저장장치에 저장된 에너지를 사용하여 고전력 에너지를 공급할 수 있도록 설계하였다. 이때 Cap은 충전되어있는 상태이다. 따라서 공급되는 전력은 스위치 A, B를 켜서 전력을 공급하고 에너지 저장장치의 용량에 따라 공급될 수 있는 전압은 달라진다. 전력의 공급량을 파악하기 위해 Cap의 전류 공식을 이용하였다. 이를 통해 Cap의 용량에 따라 공급될 수 있는 공급 시간을 파악한다.

Table 2 Features of Spartan 6 Development Board

	Value	Unit
Voltage	4.5 ~ 5.1	V
Minimum Current	60	mA
Clock frequency	50	Hz
I/O Supply Voltage	3.3	V

Table 3 Features of HC-06

	Value	Unit
Voltage	3.6 ~ 6	V
Minimum Current	40	mA
Communication Distance	10	m
RF Band	2.4 ~ 2.48	V
Reception Sensitivity	-80	dBm

4.2 APP 소비 전류 측정

Table 4는 APP만 동작시킬 때와 APP과 BT 모듈을 동시에 동작할 때의 소비 전류와 Cut-off 될 때의 최대 전류를 나타낸다.

소비 전류는 모듈을 동작했을 때의 평균 전류를 뜻하며 Cut-off 될 때의 최대 전류는 모듈을 동작하게 할 수 있는 최소한의 전류를 의미한다. 따라서 모듈을 정상적으로 동작시키기 위해서는 APP만 동작시킬 때는 최소공급 전압은 5v, 최소공급 전류는 40mA로 최소 전력은 0.2W이다. 태양광판을 사용할 때 공급할 수 있는 최대전력은 최대 0.3W이기 때문에 APP은 에너지 하베스팅만으로 공급이 가능하다. 하지만 HC-06을 동시에 동작시킬 때 최소 전력은 0.36W이므로 공급 최대전력보다 부족하다. 따라서 4.3에서 Cap에 공급되는 에너지를 통해 충분한 전력이 공급될 수 있는지 확인한다.

Table 4 Current consumption measurement

	Operating Current	Cut-off Current
APP : On BT : Off	36mA	40mA
APP : On BT : On	60mA	80mA

4.3 모드 별 소비 전력 측정

1) Active 모드

Fig. 6은 Active 모드에서 용량이 1.5 mF인 Cap에 저장되는 전압을 측정하는 것이다. 전원 공급기를 통해 전압은 5V, 전류는 40mA를 공급한다. 초기 조건은 Cap으로 인가되는 스위치를 Off 된 상태로 Cap에 전력이 공급되지 않는다. 그리고 Cap에 인가되는 스위치를 On 시킴에 따라 APP에서 공급되는 전압을 측정하는 결과 6.04 초 뒤에 Cap이 충전됐다. 이를 통해 Cap의 전류 공식인 $I_c = C \frac{dV_c}{dt}$, $I_c =$ Cap Current, $C =$ Capacitance, $t =$ time, $V_c =$ Cap Voltage를 통해 Cap에 충전되는 전류는 3.3mA로 측정되었다. APP에 공급되는 전압은 5V, 전류는 36.70mA로 Cut-off 전류 내에서 공급되도록 설계하였다.

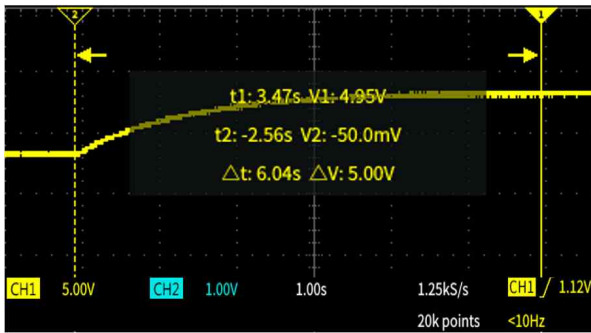


Fig. 6 Energy storage voltage in active mode

2) Sleep 모드

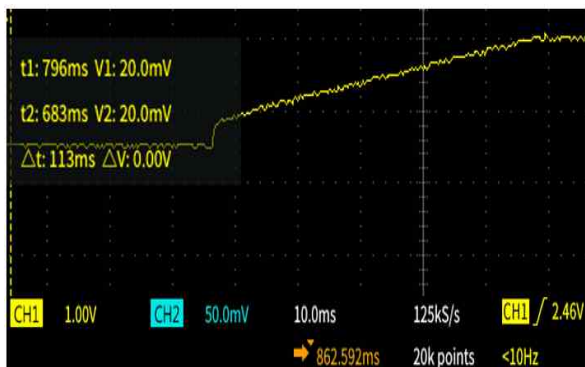


Fig. 7 Energy storage voltage in sleep mode

Fig. 7은 Sleep 모드에서 Cap의 전압을 나타낸다. 전원 공급기를 사용해 인가전압은 1.5V, 전류는 30mA로 APP의 공급전력보다 낮다. 따라서 APP에 인가되는 스위치를 Off 시키고 Cap에 인가되는 스위치는 켜서 Cap에만 전력을 충전시킨다. 따라서 공급전력만큼 Cap의 전압이 상승하고 있다.

3) High Performance 모드

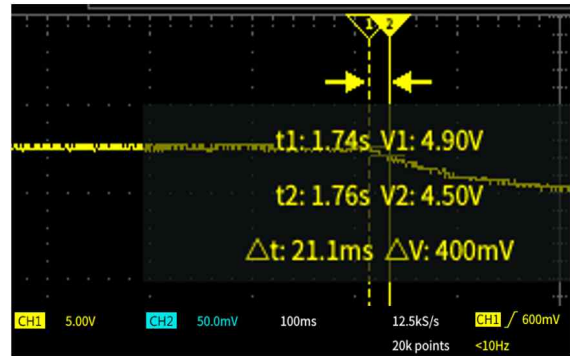


Fig. 8 Energy storage voltage in high performance mode

Fig. 8은 High Performance 모드에서 Cap의 전압을 나타낸다. 초기 조건은 Cap에 완충되어 있는 상태이다. 그리고 Cap에서 APP으로 인가되는 스위치를 On시키고 BT 모듈의 전원 인가 스위치를 On시킨 경우의 Cap에서 방전되는 전압과 시간을 측정하였다. 이때 Cap의 전류 공식을 이용하여 Cap에서 공급되는 전류를 측정한다. dV_c 는 500mV이고 dt 는 21.1ms이다. Cap에 충전되는 전류는 23.696mA이다. APP과 BT 모듈이 모두 동작시킬 수 있는 전류는 60mA로 Cap의 공급전류와 인가 전류는 각각 23.696mA와 36.7mA로 총 공급전류는 60.396mA이다. 따라서 공급전류가 동작시킬 수 있는 전류를 크기 때문에 21.1ms만큼 High Performance 모드를 동작시킬 수 있다.

5. 결론

본 논문은 에너지 하베스팅을 통해 들어오

는 전력을 MPPT를 이용하여 전력량을 조절하고 Switch Control Unit은 Probe와 Stack을 이용해 전력량을 분석하여 비휘발성 Application이 전력에 맞는 동작을 할 수 있도록 제어하고 Switch를 통해 에너지를 에너지 저장장치로 저장하거나 APP에 공급할 수 있도록 설계하였다. 그리고 제안한 스위치 시스템을 각각의 모드 별로 확인하였고 High Performance 모드는 21.1ms 동안 가능하다. 하지만 용량의 크기를 증가시키기에 따라 High Performance 모드의 동작 시간을 증가시킬 수 있을 것으로 기대한다.

향후에는 Switch Control Unit을 설계하여 전력의 변동을 파악하고 모드 별로 동작하기에 충분한지 확인할 예정이다.

제안한 고출력 에너지 수확 시스템을 이용해 무선통신 등의 동작을 하는 고출력의 어플리케이션을 구동시킴으로써 고출력 시스템에 대한 에너지 하베스팅의 활용범위를 넓힐 수 있을 것으로 기대한다.

References

Cong Wang, Naehyuck Chang and Younghyun Kim, "Storage-less and converter-less maximum power point tracking of photovoltaic cells for a nonvolatile microprocessor", 2014 19th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), 2014, DOI: 10.1109/ASPDAC.2014.6742919

Hyung Gyu Lee, Naehyuck Chang, "Powering the IoT: Storage-Less and Converter-Less Energy Harvesting", The 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2015, DOI: 10.1109/ASPDAC.2015.7058992

Trishan Esum, Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, DOI: 10.1109/TEC.2006.874230

Teodora Sanislav, George Dan Mois, Sherali Zeadally, Silviu Corneliu Folea, "Energy

Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT)", IEEE Access, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064066

F. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive survey," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.010

M. Prauzek, J. Konecny, M. Borova, K. Janosova, J. Hlavica, and P. Musilek, "Energy harvesting sources, storage devices and systemtopologies for environmental wireless sensor networks: A review," mdpi.com, 2018, DOI: 10.3390/s18082446



김 용 석 (Yongseok Kim)

- 충북대학교 전자공학과 공학사
- (현재) 충북대학교 전자정보대학 반도체공학과 석사과정
- 관심분야: SoC, Energy harvesting system Design



박 용 수 (Yongsu Park)

- 충북대학교 전자공학과 공학사
- (현재) 충북대학교 전자정보대학 반도체공학과 석사과정
- 관심분야: SoC, Energy harvesting system Design



백 돈 규 (Donkyu Baek)

- 정회원
- 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 공학사
- 한국과학기술원 전기전자공학부 공학석사
- 한국과학기술원 전기전자공학부 공학박사
- (현재) 충북대학교 전자정보대학 전자공학부 조교수
- 관심분야: IoT system, SoC design, Cyber-physical system