슈퍼커패시터를 이용한 무선센서노드의 전원에 관한 연구

김형표* · 김진규

A Study of Power Source for Wireless Sensor Node Using Supercapacitors

Hyungpyo Kim* and Jingyu Kim

Abstract

This paper presents the power source of wireless sensor node (WSN) using supercapacitors and a solar cell. Supercapacitors have high lifetime cycling compared to that of batteries. Supercapacitors are connected in series to achieve higher voltage and a voltage balancing circuit is required to ensure that no individual cell goes overvoltage. We employ an active balancing circuit that draws minimal current by using transistors. A diode is connected in series with each supercapacitor. A new balancing circuit that equalize the cells-voltage reduces energy consumption of supercapacitors. Voltage of operating WSN is applied 2.2-3.3V by DC/DC converter and supercapacitor voltage 2.2-5.1V. Maximum operating time of wireless sensor node is about 16 hours in full charging.

Keywords : Wireless sensor node, Supercapacitor, Power source, Balancing circuit

1. 서론

무선센서네트워크의 동작 시간을 늘리는 방법에는 무선센서노드 간의 통신 프로토콜 개선에 의한 에너지 절약, 무선센서노드를 구성하는 마이크로컨트롤러, 무선통신소자, 센서 등 소자의 소비전력 개선, 무선센서노드에 에너지를 공급하는 전원 개선 등의 방법이 있다. 무선센서노드(WSN: wireless sensor node)의 전원 사용시간은 센서네트워크의 유지보수와 동작시간에 핵심적인 영향을 미친다 [1,2]. 최근까지 무선센서노드의 전원을 구성하는 방법에는 일차전지, 이차전지와 태양전지, 이차전지와 슈퍼커패시터와 태양전지 등으로 구성하고 있다[3-9].

초기 무선센서노드 설계 시에는 전원으로 일차전지만을 사용하여 1-2년의 수명을 목표로 제작하였으나, 사용 후 교체 비용과 폐기에 따른 환경문제가 발생하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 이차전지와 태양전지를 사용하여 시스템을 구성하여 환경문제를 해결하고 수명을 연장하는 설계와 연구가 진행되었다. 이차전지로는 납축전지, 니켈수소전지, 리튬이온전지와 리튬폴리머전지 등이 채택이 되어 태양전지와 결합하여 태양에너지로 이차전지를 충전하여 수명을 연장하였다.

이차전지와 슈퍼커패시터를 결합한 시스템은 무선센서노드가 데

이터를 전송할 때 순간적으로 높은 에너지를 소비하고 대기모드에 서는 거의 소비하지 않으므로 순간적인 높은 에너지를 낼 수 있는 슈퍼커패시터를 결합하여 사용하므로 이차전지의 수명을 연장하는 방법이다. 다만 이차전지의 충방전 횟수가 500-1000회 이내로 수명이 3-5년 정도이나 슈퍼커패시터의 경우 충방전 횟수가 100,000-1,000,000회 이내로 거의 반영구적으로 사용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 태양전지와 슈퍼커패시터만으로 무선센서노드의 전원을 구성하고, 2개의 슈퍼커패시터를 직렬로 연결하여 충전균형회로로 각 소자의 전압을 동일하게 하는 방법 등에 대해서 연구하였다.

2. 시스템 구성

2.1 하드웨어 구성

Fig. 1은 태양전지와 슈퍼커패시터만으로 무선센서노드의 전원을 구성한 전체 시스템의 개략도이다. 슈퍼커패시터는 정격전압이 낮으므로 과전압 방지 회로를 태양전지 다음 단계에 결합하였다. 그리고 슈퍼커패시터 2개를 직렬로 연결하여 전체 전압을 높이고 직렬 연결된 각 커패시터의 전압을 동일하게 유지하는 균형회로를 슈퍼커패시터 앞 단계에 구성하였다. 슈퍼커패시터의 전압은 충전과 방전할 때 전압이 전지와 같이 일정하지 않으므로 DC/DC 컨버터를 슈퍼커패시터 다음 단계에 연결하여 일정전압을 무선센서노드에 공급하

경북대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

*Corresponding author: hpkim@knu.ac.kr

(Received : Jun. 18, 2012, Revised : Aug. 31, 2012, Accepted : Sep. 3, 2012)

Fig. 1. Schematic of power source and wireless sensor node.

Table 1. Specifications of the devices

Devices	Parameters	Value
Solar cell	Open voltage	9 V
	Short current	155 mA
	Model no.	SPM-150
DC/DC converter	Input voltage	1.5- 5.5 V
	Output voltage	3.3 V
	Supply current	150 mA
	Consumption current	30 μ A
Wireless microcontroller	Model no.	LD39015M33R
	Input voltage	2.2- 3.6 V
	Rx current	50 mA
	Tx current	45 mA
	sleep current	5 μ A
Supercapacitor	Model no.	JN5121
	Capacity	100 F
	Voltage	2.7 V
	Model no	nuinTEK

도록 하였다. 전체 시스템에 사용된 소자의 사양은 Table 1과 같다.

무선센서노드에 사용된 마이크로컨트롤러는 Jennic사의 JN5121로 입력 전압 범위가 2.2-3.6 V이고, 슈퍼커패시터 2개를 직렬 연결하면 5.4V의 전압이 발생하므로 이와 같은 조건을 만족하는 DC/DC 컨버터로 TI사의 LD39015M33R을 사용하여 3.3 V 일 정전압을 무선센서노드에 공급하였다.

Fig. 2는 제작한 무선센서노드에 적용한 태양전지의 특성을 조사한 결과로 개방회로 전압은 8.2 V, 단락 전류는 182 mA이고, 최대 전력은 1,050 mW로 6.5 V 근처에서 측정되었다. 태양전지의 최대 전력공급 전압과 2개 직렬연결된 슈퍼커패시터와의 전압차이는 1.1 V인데, 두 소자 사이에 태양전지로의 역전류 방지 다이오드와 균형 회로 다이오드의 순방향 전압 강하를 통해서 최대전력공급 전압 주위에서 동작하도록 하였다. 태양 전지로 슈퍼커패시터의 충전은 Fig. 3과 같이 맑은 날은 30분 이내에 완전 충전되었다.

제작한 전체 시스템의 사진은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 시스템의 외부 사진으로 태양전지를 시스템의 위쪽에 설치하였고, Fig. 4(b)는 시스템의 내부 사진으로 좌측부분이 직렬 연결한 슈퍼커패시터이고 중앙에 균형회로와 DC/DC 컨버터가 있고, 우측에 무선센서노드가 설치되었다.

Fig. 2. Power and current of the solar cell.

Fig. 3. Charging voltage of supercapacitors by the solar cell.

Fig. 4. Photograph of the system ; (a) The system outside, (b) The system inside.

2.2 균형회로

직렬 연결한 슈퍼커패시터에 균형회로를 추가하면 각각의 전압을 동일하게 유지할 수 있으므로 하나의 슈퍼커패시터만 과충전되어 수명이 짧아지는 현상을 방지할 수 있다. 균형회로의 종류는 크게 수동형과 능동형으로 분류할 수 있고, 수동형은 Fig. 5(a)와 같이 저항 (R_1 , R_2)를 슈퍼커패시터 (C_1 , C_2)와 같이 직렬 연결하면 각 저항의 전압은 식(1), (2)와 같이 되므로 각 슈퍼커패시터의 전압도 식(1), (2)와 동일한 값을 가진다. 저항 R_1 , R_2 는 정밀저항을 사용하여 최대한 동일한 값을 갖도록 하여야 전압 V_1 과 V_2 사이에 오차를 최소화할 수 있다. 이때 V_t 는 인가전압이다.

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_t \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_t \quad (2)$$

능동형은 Fig. 5(b)와 같이 커패시터의 전압을 연산증폭기를 이용하여 트랜지스터 (Q_1 , Q_2)의 베이스단자 (B_1 , B_2)를 스위칭하여 전압을 조정한다[2]. 수동형은 간단하게 구성할 수 있는 장점이 있으나 직렬 연결된 정밀저항으로 방전이 계속 진행되어서 에너지 소비가 생기는 단점이 있다. 능동형은 수동형보다는 복잡하게 회로를 구성하나 수동형 보다 에너지 소비가 적고 각 커패시터의 전압을 정밀하게 조정할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 5. The balancing circuits of supercapacitors ; (a) Passive, (b) Active.

본 연구에서는 Fig. 5(b)와 같은 능동형을 사용하였으나 능동형도 연산증폭기와 전압분배 저항에서의 에너지 소비가 발생하였다. 무선센서노드의 전체시스템은 최대한 에너지 소비를 감소시켜야 하므로 균형회로의 에너지 소비를 줄이기 위해서 Fig. 6과 같이 슈퍼커패시터와 트랜지스터, 슈퍼커패시터와 저항 사이에 다이오드를 연결하여 균형회로로 누출되는 에너지 소비를 막는 개선 균형회로를 구성하였다. Fig. 6(b)의 능동형 개선 균형회로의 동작은 트랜지스터 Q_1 이 ON되고 트랜지스터 Q_2 가 OFF되면 슈퍼커패시터 C_2 가

충전이 된다. C_2 가 충전이 완료되면 트랜지스터 Q_2 가 ON되고 트랜지스터 Q_1 이 OFF되어 슈퍼커패시터 C_1 이 충전된다. 이 때 슈퍼커패시터에 충전된 전압 V_1 , V_2 는 다이오드 D_1 , D_2 에 의해서 트랜지스터가 있는 방향으로 전류 누설을 차단한다. 개선한 능동형 균형회로를 SPICE로 시뮬레이션한 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 6. The proposed balancing circuits of supercapacitors with diodes ; (a) Passive, (b) Active.

Fig. 7. Simulation results of the proposed active balancing circuit using SPICE.

시뮬레이션은 1000s 동안 충전하고 1000s 동안 방전하는 방식으로 수행하여 각 슈퍼커패시터의 전압을 측정한 결과 동일한 전압이 측정되었다. 이는 시뮬레이션에 사용한 슈퍼커패시터의 값을 동일하게 사용하므로 얻어지는 결과로 여겨진다. 개선 능동형 균형회로를 충전 방전 실험을 반복할수록 전압차이가 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 개선 능동 균형회로는 태양전지에서 슈퍼커패시터로 에너지를 저장할 때에는 태양전지의 전압으로 동작하여 슈퍼커패시터의 전압을 동일하게 충전하고, 방전할 때에는 다이오드에 의해서 차단되므로 동작하지 않는다. 따라서 방전할 때에는 슈퍼커패시터 사이에는 전압차이가 발생하지만 충전할 때 전압차이가 제거되므로 전압차이는 일정전압이상 발생하지 않는다. 방전할 때는 전압차이가 발생하지만 충전을 완료하면 전압차이는 사라지고, 방전할 때의 전압차이

는 둘 중 하나의 커패시터에서만 에너지를 공급하므로 나타나는 현상이지만, 슈퍼커패시터의 정격전압을 초과하지는 않으므로 시스템에는 영향이 없었다. 그리고 기존 능동 균형회로와 개선 능동 균형회로의 무부하 자연 방전 실험결과는 Fig. 9와 같다. 개선 능동형 균형회로는 60시간까지 약 1.0 V의 자체 방전이 발생하였지만 기존 능동형 균형회로는 약 3.0 V의 자체 방전이 발생하여 개선 능동형 균형회로가 자체 방전 제한 성능이 뛰어남을 알 수 있다.

Fig. 8. Difference voltage of the proposed active balancing circuit of supercapacitors.

Fig. 9. No load discharge voltages of the active balancing circuits of supercapacitors.

3. 실험 및 결과

무선센서노드는 온도와 습도를 Sensirion사의 SHT10으로 측정하여 코디네이터에 전달한다. 무선센서네트워크는 IEEE 802.15.4 기반으로 Zigbee 표준을 사용하여 2.4 GHz로 통신을 한다. 무선센서노드가 온도와 습도를 측정하고 통신할 때 전체 공급되는 전류는 Fig. 10과 같다. 1분에 하나의 데이터를 송신하도록 1.5초간 시스템 초기화 후 1초간 온도와 습도를 측정하여 전송하고 57.5초간 슬립모드로 시스템의 전류를 최소화 하였다. 시스템에 공급되는 전류

는 슬립모드에서는 0.26 mA, 데이터 송신 때에는 62 mA, 시스템 초기화 때에는 55 mA가 공급되어, DC/DC 컨버터의 공급전압 3.3V로 시스템이 1분간 소비하는 에너지는 약 526 mJ이었다.

Fig. 10. Supply current of the system.

슈퍼커패시터가 완전 충전되면 슈퍼커패시터는 다음 식(3)과 같이 에너지를 저장한다.

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} C(V_{tc}^2 - V_{td}^2) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot (5^2 - 2.2^2) \\ &= 504 J \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, Fig. 6(b)에서 직렬연결한 슈퍼커패시터 양단 전압 V_t 가 완전충전된 전압 V_{tc} 를 5 V, 무선센서노드 동작 최저전압 V_{td} 를 2.2 V, C 는 100 F 슈퍼커패시터 2개를 직렬연결하여 얻은 값 50 F이다. 저장한 에너지로 무선센서노드의 최대동작시간은 약 16시간이었다. 무선센서노드의 최대동작시간 실험으로 슈퍼커패시터 양단의 전압을 측정된 결과는 Fig. 11과 같다. 완전 충전된 후 동작이 정지할 때까지 무선센서노드 동작 실험을 한 결과 약 16시간 동작하여 계산결과 값과 일치하였다. 16시간은 완전 충전 후 야간을 보낸 후 일출할 때까지 슈퍼커패시터의 전압이 무선센서노드의 최저전압(2.2 V)보다 높게 유지할 수 있는 시간이다. 우천 시에도 시스템을 동작한 결과 서서히 전압이 상승하며 계속 동작함을 확인하여 우천 시에도 계속 동작함을 확인하였다.

Fig. 12는 1일간 시스템이 동작하는 동안 슈퍼커패시터 양단의 전압을 측정된 결과로 24시간 계속 무선센서노드의 최저전압(2.2 V)이상을 유지하였다. 일몰 할 때에는 서서히 전압이 감소하고 야간 11시간 동안 계속 전압이 감소한 후 일출과 함께 충전이 시작되었다. 처음 3.1 V에서 완전 충전할 때까지 2시간이 소요된 이유는 일출할 때는 별이 약하기 때문이다. 따라서 태양전지와 슈퍼커패시터 2개를 직렬 연결하고 개선 균형회로를 결합한 시스템으로 무선센서노드 전원을 구성한 결과 반연구적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 13은 무선센서노드에서 보내온 온도와 습도 데이터를 모니

터링하는 서버의 결과이다. 서버는 1분마다 보내오는 데이터를 온도와 습도의 그래프로 확인하였다. 태양전지, 과전압보호회로, 균형회로, 슈퍼커패시터와 DC/DC 컨버터를 모델링하여 회로해석하는 시뮬레이션 결과는 보다 개선된 무선센서노드 전원 개발에 도움이 되므로 계속 연구를 수행하여 보고하고자 한다.

Fig. 11. Maximum operating time of the system.

Fig. 12. Supercapacitors voltage in one-day.

Fig. 13. Monitoring system for temperature and humidity in wireless sensor network.

4. 결론

본 논문에서는 무선센서노드의 전원을 2개의 슈퍼커패시터와 태

양전지로 구성하였으며, 직렬 연결된 슈퍼커패시터의 균형회로를 자체방전을 제한하는 개선 균형회로로 제안하였다. 무선센서노드는 온습도를 측정하여 분당 일회 데이터를 전송하며 완전 충전 후 약 16시간을 동작하였다. 맑은 날 30분 이내에 태양전지로 슈퍼커패시터를 충전하여 야간에도 전원공급 없이 동작하여 24시간 동작을 확인하였다. 따라서 태양전지와 슈퍼커패시터로 전원을 구성한 무선센서노드는 전원교체 없이 반영구적으로 동작이 가능하며, 향후 저전력의 마이크로컨트롤러와 통신소자를 사용한다면 최대동작시간은 더욱 연장될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, "Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks", *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 407-418, 2008.
- [2] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R.W. De Doncker, "Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, pp. 1135-1141, 2005.
- [3] F.I. Simjee and P.H. Chou, "Efficient charging of supercapacitors for extended lifetime of wireless sensor nodes", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1526-1536, 2008.
- [4] H. Chen, B. Wei, and D.S. Ma, "Energy storage and management system with carbon nanotube supercapacitor and multidirectional power delivery capability for autonomous wireless sensor nodes", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 12, pp. 2897-2909, 2010.
- [5] R. Lajara, J. Alberola, J. Pelegr, T. Sogorb, and J.V. Llario, "Ultra low power wireless weather station", *2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 469-474, 2007.
- [6] M. Uno, A. Kukita, and K. Tanaka, "Equalization chargers using capacitor-diode networks for series-

connected energy storage cells”, *IPEC 2010*, pp. 538-543, 2010.

- [7] J.H. Yoo, C.H. Lee, Y.S. Ock, and W.Y. Chung, “WSN-based coastal environment monitoring system using flooding routing protocol”, *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 21, No. 1, pp. 46-52, 2012.
- [8] H.P. Kim, J.G. Kim, and K.R. Sohn, “Development

of wireless wind chill temperature measurement system”, *J. Kor. Sensors Soc.*, Vol. 18, No. 3, pp. 245-250, 2009.

- [9] R. Kannan, R. Kalidindi, S.S. Iyengar, and V. Kumar, “Energy and rate based MAC protocol for wireless sensor networks”, *ACM SIGMOD*, Vol. 32, Issue 4, pp. 60-65, 2003.

김 형 표 (Hyungpyo Kim)

- 1998년 경북대학교 전기공학과(공학박사)
- 1996년 ~ 1998년 보국전기공업(주)
- 1998년 ~ 2008년 상주대학교 전자전기공학부 교수
- 2008년 ~ 2012년 경북대학교 산업전자전기공학부 교수
- 2012년 ~ 현재 경북대학교 전기공학과 교수
- 관심분야 : WSN, 센서응용시스템, Supercapacitor

김 진 규 (Jingyu Kim)

- 1998년 경북대학교 전기공학과(공학박사)
- 2000년 ~ 2001년 경북대학교 전자전기공학부 BK21조교수
- 2001년 ~ 2008년 상주대학교 전자전기공학부 부교수
- 2008년 ~ 2012년 경북대학교 산업전자전기공학부 부교수
- 2012년 ~ 현재 경북대학교 전기공학과 부교수
- 관심분야 : 센서응용시스템, 물리센서