
저자 (Authors)	최성진
출처 (Source)	전력전자학회지 18(2) , 2013.04, 31-36 (6 pages) KIPE MAGAZINE 18(2) , 2013.04, 31-36 (6 pages)
발행처 (Publisher)	전력전자학회 THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02142145
APA Style	최성진 (2013). 에너지 하베스팅 기술과 전력전자. 전력전자학회지, 18(2), 31-36.
이용정보 (Accessed)	203.250.84.*** 2017/08/01 16:15 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

특집 : 스마트에너지 전력변환 기술

에너지 하베스팅 기술과 전력전자

최 성 진

(울산대 전기공학부 조교수)

빛에너지, 열에너지, 운동에너지 등 활용되지 않고 버려지는 에너지를 수집하여 재활용하는 기술인 에너지 하베스팅 기술은, 중소규모 이상의 출력을 얻도록 최적화된 태양광 및 태양열, 풍력 발전과 같은 신재생에너지 기술과 달리 그 출력전력이 매우 작으므로 상대적인 효율가치를 찾기 힘들어 크게 주목받지 못하였다. 하지만 최근 모바일 기술의 발달로 각종 센서의 모바일화, 지능화에 기반한 무선센서네트워크 기술과 함께 에너지 하베스팅 기술은 그 활용가치가 재평가 받고 있다. 본 고에서는 무선센서네트워크용 에너지 하베스팅 소스들을 소개하고 적용되는 전력전자기술을 살펴보고자 한다.

1. 서론

무선센서네트워크(wireless sensor network)는 다양한 응용범위에 사용될 수 있다. 예를 들어 건물에 사용되는 에너지를 더욱 효율성 있게 배분하는 스마트 빌딩기술에서 다양한 위치의 온도 및 조도정보와 사람의 존재여부를 조사하여 활용하거나, 접근하기 힘든 곳에서 유해 화학물의 누출을 감지하거나, 항공기나 선박구조물의 전체적인 피로도 정보를 수집하거나, 자동차 타이어의 가속이나 압력을 지속적으로 측정하는 센싱 용도 등 그 활용범위는 점차 확대될 수 있다. 많은 전문가들은 궁극적으로 무선센서네트워크는 유비쿼터스 환경을 구축하고 스마트에너지 기술을 완성하는 중요한 구성요소로 간주하고 있다.

그런데, 10미터이상의 데이터 전송을 한다면 소모전력이 급격히 증가하기 때문에, 무선센서네트워크에서는 1미터에서 10미터 거리를 넘지 않도록 많은 수의 소형 무선센서노드(wireless sensor node)들을 촘촘히 배치하여 서로 무선으로 정보를 주고 받으며 동작하도록 설계한다. 센서노드당 개별 평균 소비전력은 10 mW 수준까지 낮아졌으며 최근 수백 uW수준의 센서노드도 등장하였다.

이러한 개념의 센서네트워크가 제대로 동작하려면 여러 곳

에 배치된 다수의 노드들에 전원을 배선하는 문제가 생긴다. 많은 개별노드들이 배터리를 채용한다면 가격도 가격이거니와 배터리 유지 및 보수 또한 문제가 되며, 따라서 배터리의 수명이 바로 센서의 수명을 좌우하게 된다. 흔히 사용되는 리튬일차전지의 에너지밀도를 2880J/cm³로 가정한다면, 1cm³의 크기를 가지는 100uW의 평균소비전력을 가지는 센서노드를 배터리로 모두 채우더라도 동작지속시간은 약 1년 정도 밖에 되지 않는다. 알칼리배터리를 사용한다면 이보다 더 수명이 짧다²⁾.

에너지 하베스팅(energy harvesting) 또는 에너지 포집(energy scavenging) 기술은 빛에너지, 열에너지, 운동에너지 등 활용되지 않고 버려지는 에너지를 수집하여 재활용하는 기술이다. 빛에너지의 경우는 광전효과(photoelectric effect) 및 광기전력효과(photovoltaic effect)를 이용한 것으로 야외의 태양광 또는 실내광을 이용한 에너지 수집을 시도한다. 열에너지의 경우는 제백효과(Seebeck effect) 및 초전효과(pyroelectric effect)를 이용한 것으로 온도차를 활용한다. 진동에너지의 경우는 압전효과(piezoelectric effect)를 사용하거나 전자기유도(electromagnetic induction)원리를 이용하는 전기기계식(electromechanical) 발전을 활용한다.

본 고는 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서는 상용 무선센서네트워크의 구조를 파악하고, 소비전력프로파일을 통해 요구되는 공급전원의 수준을 유추해본다. 3장에서는 다양한 에너지 하베스팅 소스의 종류를 이해하고, 이의 전기적인 등가 모델을 이해한다. 4장에서는 요구되는 전력전자기술의 설계 요구사항을 정리해 본다. 그리고 결론에서 에너지 하베스팅 기술의 전망에 대해 언급하며 본 고를 마무리한다.

2. 무선센서네트워크 부하의 이해

2.1 센서노드의 구성

무선센서네트워크는 그림1과 같이 정보 수집 대상 공간에

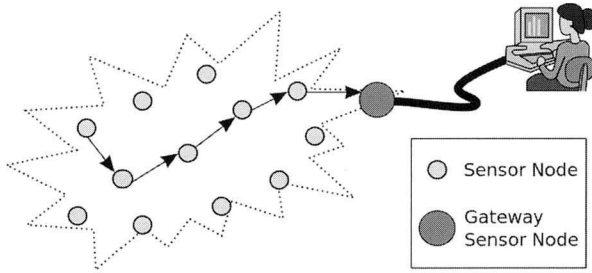


그림 1 무선센서네트워크의 개념((1)에서 발췌)

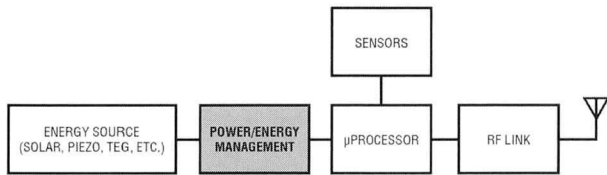


그림 2 무선센서노드 내부구성도((3)에서 발췌)

밀집 분포되어 여러 가지 유용한 데이터를 수집하여 한 곳에 전달하도록 설계된 장치를 말하는데, 수십개에서 수백개 이상의 센서노드들과 게이트웨이, 정보수집장치로 구성되어 있다. 개별 센서노드들은 그림2와 같이 구성되는데, 센서, 송수신 데이터처리를 위한 마이크로프로세서(uProcessor), 무선 송수신을 위한 송수신 장치(radio transceiver)로 구성되어 있다. 전원공급을 위해서는 배터리 또는 에너지 하베스팅 소스와 전원관리장치 블록도 추가되어야 하며, 경우에 따라서 에너지 저장장치가 필요할 때가 있다. 그림3에는 Crowbar Technology에서 상용으로 판매하는 무선센서노드인 Mica2 제품군의 사진을 나타내었다. 마이크로프로세서로는 Atmel사의 ATmega 128, RF 송수신부로는 TI-Chipcon사의 CC1000을 사용하고 있다.

2.2 부하프로파일 분석 및 평균소비전력

선행연구결과에 의하면 Multi-hop통신을 하는 Mica2 센서

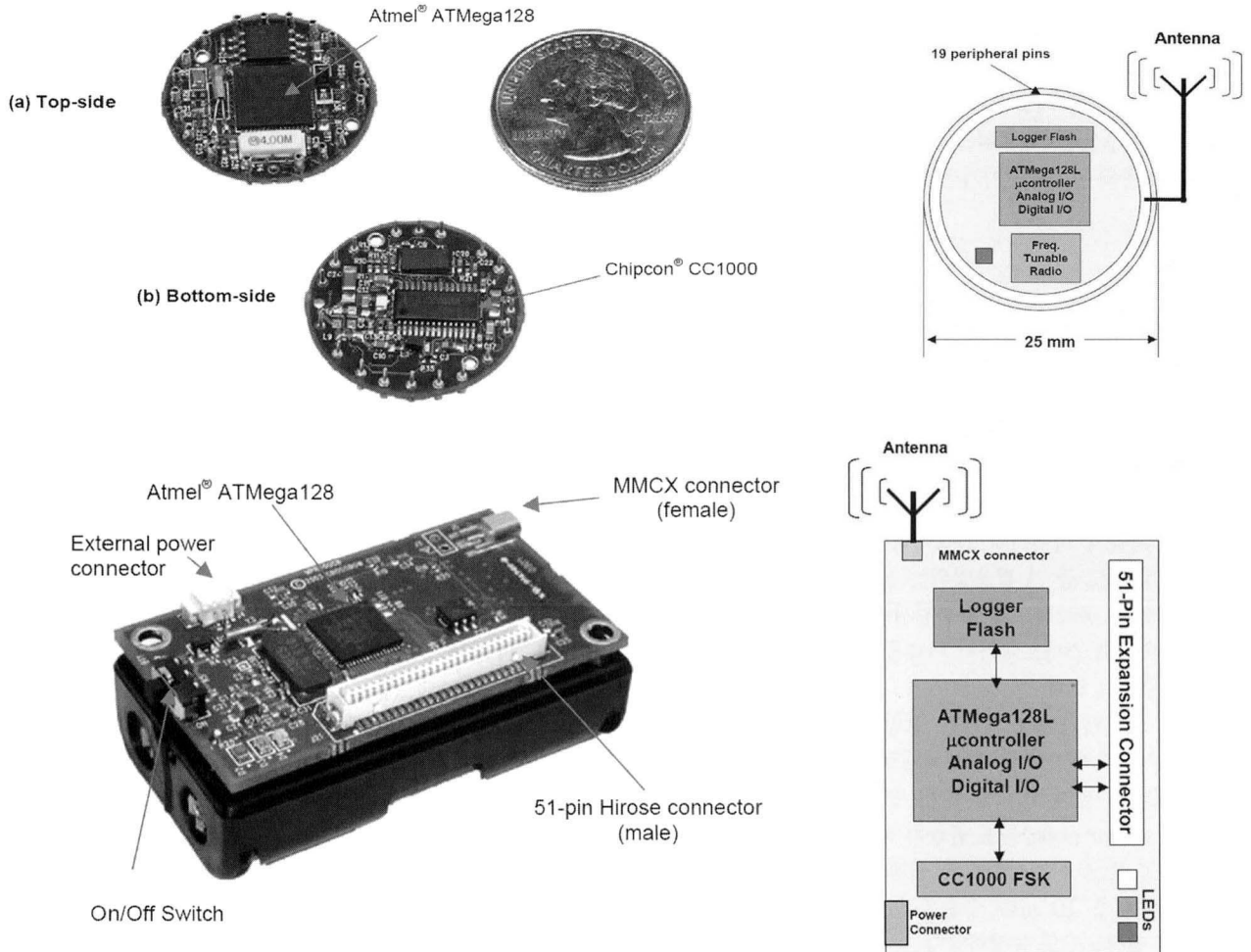


그림 3 다양한 무선센서노드 제품군((4)에서 발췌)

노드는 표1과 같은 전력소모를 가지며, 시간에 따른 부하프로파일은 그림 4와 같다⁽⁵⁾.

따라서, 해당 무선센서노드의 개별소비전력으로부터 다음과 같은 특징을 도출할 수 있겠다. 먼저, 응용대상에 따라 다르겠지만, 대개의 모니터링 대상은 데이터 수집 및 전송이 간헐적으로 일어난다. 둘째, 수신(RX)모듈 동작 시에는 CPU의 Active모드 소비전력대비 두 배까지 사용하고, 송신(TX)모듈은 그 세 배정도의 소비전력을 사용한다. 즉 소비전력이 가장 많을 때는 TX모듈이 동작할 때이다. 셋째, 평균 소비 전력은 매우 낮을 것이라는 점을 알 수 있다. 특히 수집 및 전송 빈도를 작게할 수록 평균 소비전력은 더욱 낮아질 것인데, 만일 센서노드가 동작할 때 그림 4와 같이 3V기준으로, 30mA를 33msec의 구간동안 소모한다고 가정하면, 초당 한번 전송이 일어난다면 평균소비전력은 3mW정도 수준일 것이며, 분당 한번 전송한다면 50uW수준일 것이다. 이러한 작은 파워는 현재까지 개발된 에너지 하베스팅 소스가 공급할 수 있는 정도의 충분히 낮은 수준으로 판단된다. 다음 장에서는 현재까지 알려진 에너지 하베스팅 소스의 종류를 알아보고, 그 전기적인 등가모형을 살펴해보도록 한다.

표 1 Mica2 플랫폼의 소비전류(3V 공급기준, (5)에서 발췌)

Device/Mode	Current	Device/Mode	Current
<i>CPU</i>		<i>Radio</i>	
Active	8.0mA	Rx	7.0 mA
Idle	3.2mA	Tx (-20 dBm)	3.7mA
ADC Acquire	1.0mA	Tx (-8dBm)	6.5mA
Extended Standby	0.223mA	Tx (0 dBm)	8.5mA
Standby	0.216mA	Tx (10 dBm)	21.5mA
Power-save	0.110mA	<i>Sensors</i>	
Power-down	0.103mA	Typical Board	0.7 mA

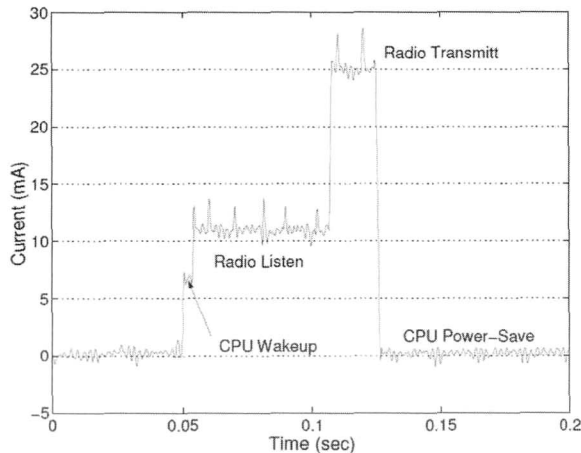


그림 4 Mica2플랫폼의 소비전류프로파일((5)에서 발췌)

3. 에너지 하베스팅 소스 종류 및 등가모델

에너지 하베스팅 소스는 태양광, 풍력등도 활용가능 하지만, 실내조건에서도 활용 할 수 있는 에너지원으로서 TEG (thermo-electric generator), EMG (electro-mechanical generator), PEG (piezo-electric generator)가 있다. 각 소스의 종류를 알아보고, 전기적인 등가모형을 살펴해보도록 한다.

3.1 TEG(thermo-electric generator)

3.1.1 구조 및 형상

TEG는 제벡효과(Seebeck effect) 및 초전효과(pyroelectric effect)를 이용한 것으로 표면 온도차를 이용하여 기전력을 발생시킨다. 이는 아이스쿨러나 냉온정수기 등에 사용하는 펠티어효과(Peltier effect)의 반대현상이다. 소자의 구조는 그림 5와 같은데, 제벡효과를 강하게 나타내는 N-형과 P-형 반도체를 직렬연결하여 두 개의 세라믹 판 사이에 위치시킨다. 그 모양과 크기는 다양하지만 대개 대부분 2-5mm 두께의 정사각형 형태로써 10mm²에서 50mm²까지의 크기가 널리 쓰인다. Tellurex, Ferrotec 등의 회사가 공급하고 있다⁽³⁾.

3.1.2 전기적 특성과 등가모델

TEG는 기본적으로 소스저항을 가지는 DC전압원으로 모델링한다. 이때 기전력은 10mV/K부터 50mV/K정도이며,

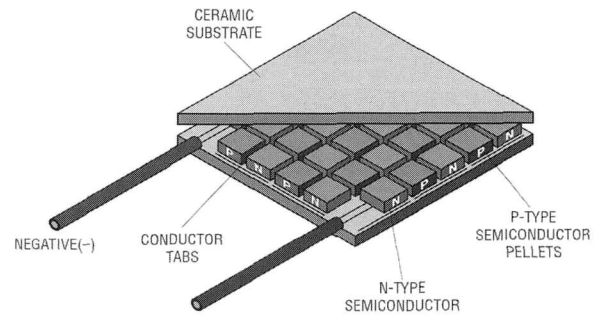


그림 5 TEG의 구조((3)에서 발췌)

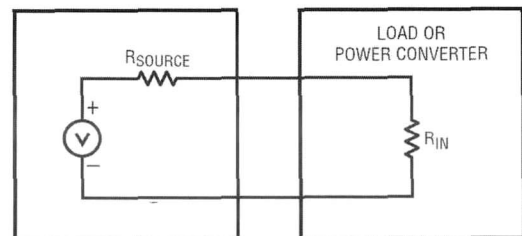


그림 6 TEG의 등가모델((3)에서 발췌)

소스저항은 0.5Ω 에서 5Ω 사이 값을 가진다. 통상 더 많은 소자를 직렬 연결할수록 기전력은 증가하나 내부저항 또는 증가하게 된다. 제조사들은 내부구조를 개선하여 더 낮은 저항을 가지도록 설계하여 공급한다.

3.2 EMG(electro-mechanical generator)

3.2.1 구조 및 형상

EMG는 전자기 유도(electromagnetic induction)원리를 이용하는 데, 가장 에너지를 얻기 쉬운 에너지 하베스팅 소자라고 할 수 있다. 다양한 형상의 기계식구조 형태가 연구되고 있으나, 기본 구성은 그림7의 Mass - Spring 구조라고 할 수 있겠다. 사람이 걸을 때 67W를 소비한다는 연구결과가 있지만, 자연적으로 걷는 보행속도가 2Hz 정도이며, 인위적으로 손으로 흔들 수 있는 주파수가 5Hz정도임을 감안할 때⁽⁹⁾, 통상 에너지 하베스팅으로 자연적으로 얻어지는 진동 주파수는 10Hz이하이다. 하지만 이런 저주파수에서 구동하는 EMG의 형상을 만들면 수 백 cm^3 이상으로 매우 부피가 커지게 되므로 기계적인 구조를 통해 외부 진동주파수를 10배이상 상향시켜

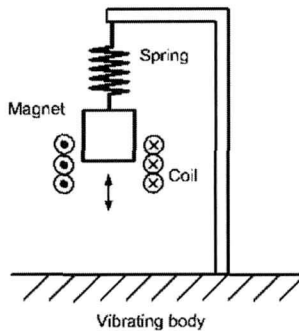


그림 7 다양한 EMG의 구조((8),(10)에서 발췌)

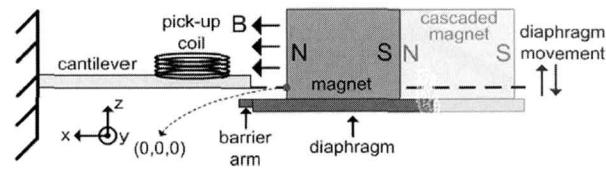


그림 7 다양한 EMG의 구조((8),(10)에서 발췌)

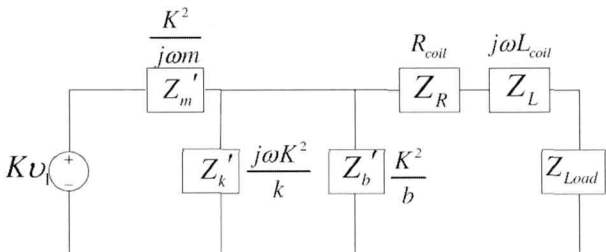


그림 8 EMG의 등가모델((11)에서 발췌)

기계시스템을 동작시키는 방식이 최근 연구되고 있다. 이러한 구조의 경우 약 3cm^3 부피의 구조기준으로 $184\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 을 얻을 수 있다고 한다⁽¹⁰⁾.

3.2.2 전기적 특성과 등가모델

EMG는 기본적으로 AC전압원으로 모델링 하며, 내부코일 권선저항과 권선인덕턴스가 직렬연결된 구조로 모델링하며 내부의 기계적인 메커니즘 또한 추가적으로 회로 모델링 가능하다⁽¹¹⁾.

3.3 PEG(piezo-electric generator)

3.3.1 구조 및 형상

PEG는 Perovskite구조의 강유전체 분극현상에 따른 압전 효과(piezoelectric effect)를 이용하여 전하를 생성한다. 이 역시 다양한 형상의 기계식 구조가 연구되고 있으며, 마찬가지로 기본 구성은 Mass-Spring 구조라고 할 수 있겠다. 그림 9와 같은 Bimorph 타입의 외팔보(cantilever) 형상이 많이 사용된다. 특정주파수에만 반응하여 큰 출력을 얻을 수 있는 공진형(resonance) 동작 전용으로 설계되거나, 광대역진동에 대응하는 비공진형(off-resonance) 전용으로 설계되기도 한다.

3.3.2 전기적 특성과 등가모델

PEG는 기계적인 진동에 의한 물리적인 특성과 전극에 전하가 포집되는 독특한 구조적인 특징을 가지고 있으므로 그림 10과 같은 AC 전류원과 병렬연결된 커패시터로 모델링 하는 것이 자연스럽다⁽¹¹⁾.

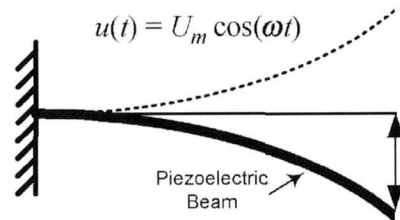


그림 9 PEG의 구조((11)에서 발췌)

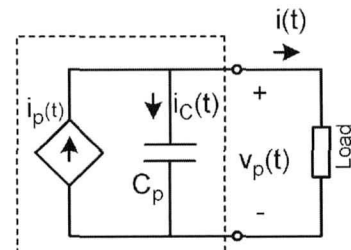


그림 10 PEG의 등가모델((11)에서 발췌)

4. 에너지 하베스팅 소스와 전력전자기술

표 2에 대표적인 에너지 하베스팅 소스의 파워밀도를 비교 도시하였다. 이러한 소스들의 공통적인 특징은 다음과 같다. 첫째, 전압 또는 전류가 일정한 크기를 유지하지 못한다. 둘째, 소스출력이 시간적으로 지속되어 나오지도 않으며 불연속적일 수 있다. 셋째, 평균출력이 10 μ W에서 10mW까지로 제한적이다. 넷째, 최대전력을 추출하기 위해서는 적절한 형태의 부하정합(load matching)이 필요하다. 따라서 무선센서노드에 안정적인 전압을 공급하기 위해서는 연결하기 위해서는 전력전자기술이 필수적일 것이다. 여기서는 앞 장에서 알아본 각각의 에너지 하베스팅 소스에 요구되는 전력전자기술을 살펴보도록 한다.

4.1 TEG용 DC/DC변환 기술

앞서 말한 바와 같이, TEG는 DC전압원으로 EMG나 PEG에 비해 사용이 좀더 용이하지만, 온도차에 따라 얻어질 수 있는 기전력이 10mV/K부터 50mV/K로서 매우 낮으므로 초저전압(ultra low voltage)에서 구동가능한 DC/DC 컨버터를 설계해야 한다. 통상 1: 50 내지는 1:100의 전압비를 가지는 승압형(step-up) 컨버터구조가 쓰인다. 최대출력을 추출하기 위해서는 컨버터의 입력임피던스도 최적으로 설계되어야 할 사항이다. 부하에 따라서 슈퍼캐패시터와 같은 외부저장장치가 함께 사용될 수도 있다. 대표적인 제어 IC로는 그림 11과 같은 Linear Technology 사의 LTC3108이 있다^[3].

표 2 대표적인 에너지 하베스팅 소스의 파워밀도비교((1)에서 발췌)

Power source	Power density	Unit
Solar (outside)	15000	uW/cm ²
Solar (inside)	10	
Temperature (dT=5 $^{\circ}$ C)	40	uW/cm ³
Vibrations	300	

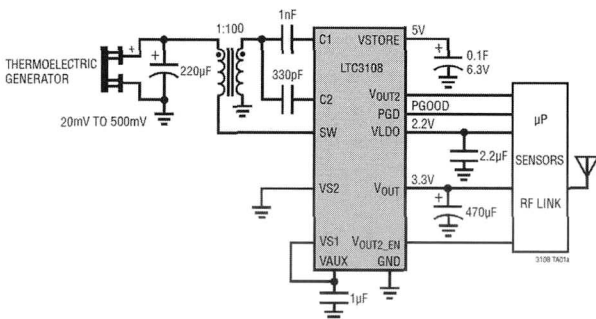


그림 11 TEG용 승압형 DC/DC컨버터((3)에서 발췌)

4.2 EMG 및 PEG용 AC/DC변환 기술

EMG나 PEG는 각기 유도성 및 용량성 내부 임피던스를 가지고 있으므로, 이를 고려하여 최대전력을 뽑아내기 위해 최적의 동작점을 찾는 제어기법 연구가 이루어진 바 있다^[7].

한편, 진동을 사용하는 EMG나 PEG는 TEG에 비해 상대적으로 고출력을 가질 수 있으나, AC형태의 에너지원이기 때문에 정류단이 추가적으로 필요한 것이 큰 문제이다. 부하에 사용할 3.3V전압을 얻는다고 할 때 정류단 + DC/DC 컨버터의 2단 구성이 일반적이다. 하지만, 기계 구조의 크기와 질량을 무한정 허용할 수 없는 제약 조건을 고려할 때 통상 수백mV이상의 전압을 얻기는 힘들 때가 많으므로 Schottky다이오드로도 정류가 불가능한 경우가 있다. 설사 정류가 가능하더라도 순방향 다이오드 전압강하 때문에 제대로 된 출력전력을 얻기가 힘들다.

이러한 문제를 극복하기 위해서 그림 12와 같이 DC/DC 컨버터의 극성제어를 통해서 정류단을 없애서 더 많은 전력을 끌어올 수 있는 회로 구조가 제안된 바 있으며, 추가 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다^{[8][12]}.

4. 결론

본 고에서는 무선센서네트워크용으로 사용될 수 있는 에너지 하베스팅 기술의 종류와 관련 전력전자기술에 대하여 개괄적으로 살펴보았다.

에너지 하베스팅 기술의 하나의 축은 부하 및 소스기술일 것이다. 부하측면에서는 무선센서네트워크의 소비전력을 더욱 낮추는 연구가 진행되고 있으며, 따라서 과거에 활용이 불가능한 수준으로 판단되었던 에너지 하베스팅 소스들도 그 용도를 찾아가고 있다. 동시에 에너지 하베스팅 소스의 파워밀도를 향상시키는 연구도 타 분야에서 지속적으로 진행되고 있다.

반면, 에너지 하베스팅 기술의 또 다른 한 축은 향상된 전력처리기술이 분명하며, 첨단 전력전자기술 개발이 반드시 요

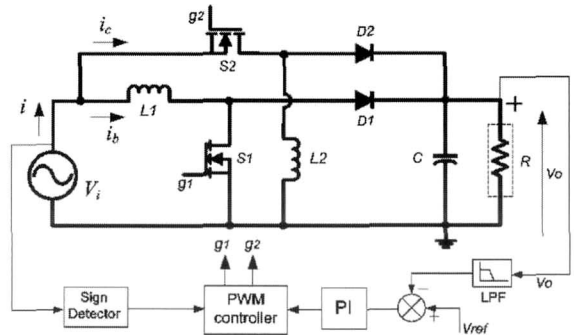



그림 12 EMG 및 PEG용 승압형 DC/DC컨버터((8)에서 발췌)

구되고 있다. 특히 이 분야는 재료공학자, 기계공학자, 반도체 설계기술자, 통신 및 알고리즘 전공자 등과의 협업이 필요하므로 매우 도전적인 과제가 될 것이다. 궁극적으로, 인체에 착용하는 미래형 전자기기의 전원을 인체의 활동으로부터 직접 공급하는 것이 가능하다면 전력전자기술의 활용도는 더욱 커질 것으로 판단된다. 이에 우리 전력전자공학도들의 역할은 더욱 중요해질 것으로 기대된다. 

참고 문헌

- [1] Wireless Sensor Node, Wikipedia website, <http://en.wikipedia.org>, Mar. 2013.
- [2] S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] D. Salerno, "Ultralow Voltage Energy Harvester Uses Thermoelectric Generator for Battery-Free Wireless Sensors," Linear Technology, Journal of Analog Innovation, Vol. 20, No. 3, Oct. 2010.
- [4] Crowbow Technology, MPR-MIB User Manual, Rev A, Jun. 2007.
- [5] M. Hempstead, N. Tripathi, P. Mauro, G-Y Wei, and D. Brooks, "An Ultra Low Power System Architecture for Sensor Network Applications," IEEE Proceedings of International Symposium on Computer Architecture, 2005, pp. 208-219.
- [6] P. Glynne-Jones, S. P. Beeby, and N. M. White, "Towards a Piezoelectric Vibration Powered Microgenerator," IEE Proc.-Sci. Meas. Technology. Vol. 148, No. 2, pp. 68-72, Mar. 2001
- [7] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 17, No. 5, pp. 669-676, Sep. 2002.
- [8] S. Dwari, and L. Parsa, "An Efficient AC-DC Step-Up Converter for Low-Voltage Energy Harvesting," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 8, pp. 2188-2199, Aug. 2010.
- [9] M. Duffy, and D. Carroll, "Generators for Power Harvesting," IEEE Power Electronics Specialist Conference, 2004, pp. 2075-2081.
- [10] Ö. Zorlu, E. T. Topal, and H. Kùlah, "Vibration-Based Electromagnetic Energy Harvester Using Mechanical Frequency Up-Conversion Method," IEEE Sensors Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 481-488, Feb. 2011.
- [11] S. Cheng, N. Wang, and D. P. Arnold, "Modeling of Magnetic Vibration Energy Harvesters using Equivalent Circuit Representation," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, pp. 2328-2335, 2007.
- [12] S. Xu, K. D. T. Ngo, T. Nishida, G-B. Chung, A. Sharma, "Low Frequency Pulsed Resonant Converter for Energy Harvesting," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 1, pp. 63-68, Jan. 2007.

〈 필 자 소 개 〉



최성진(崔城振)

1973년 2월 4일생. 1996년 서울대 공과대학 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2008년~2011년 삼성전자 영상디스플레이 사업부 책임/수석연구원. 2011년~현재 울산대 전기공학부 조교수.