

마찰전기 나노발전기를 위한 임피던스 커플러 스위치를 탑재한 3단계 전력 관리 시스템

윤보경¹, 이준영¹, 정지훈[†]

Three-Stage Power Management System Employing Impedance Coupler Switch for Triboelectric Nanogenerator

Bo-Kyung Yoon¹, Jun-Young Lee¹, and Jee-Hoon Jung[†]

Abstract

Energy harvesting is a recent technology involving the harvest and utilization of extremely small surrounding energy. Energy harvesting research is conducted in various fields. Triboelectric nanogenerators (TENGs) are energy harvesting technologies that use static electricity generated by physical movement or friction. Although TENGs generate output power in microwatt levels, they experience high internal impedance compared with other energy harvesting generators, thereby making the continuous transfer of electric power to loads difficult. This study proposes a power management system for TENGs that consists of three stages, that is, an AC/DC rectifier, an impedance coupler switch with a capacitor bank, and a DC/DC converter. In addition, the selection method of the AC/DC rectifier and DC/DC converter is proposed to maximize the amount of power transferred from energy harvesting areas. Furthermore, the impedance coupler switch and capacitor bank are discussed in detail. The validity and performance of the proposed three-stage power management system for TENGs are verified using a prototype system.

Key words: EH(Energy Harvesting), TENG(Triboelectric Nanogenerator), Renewable energy, Power management

1. 서 론

최근 사물인터넷(Internet of Things, IoT)에 대한 관심과 수요가 증가하면서 다양한 웨어러블 스마트 디바이스(Wearable Smart Device, WSD)에 사용할 수 있는 독립적인 에너지원에 관한 기술도 함께 요구되고 있다. 일반적으로 웨어러블 디바이스는 배터리를 전력원으로 사용한다. 배터리가 디바이스에서 차지하는 부피와 무게가 큰 편이므로 주로 배터리의 사양에 의해 디바이스의 부피와 무게가 결정된다. 웨어러블 스마트 디바이스는 주로 사용자의 신체에 부착하여 사용되기 때문에 일상 활동 중에도 사용에 무리가 없도록 가볍고 소형으로 개

발되어야 한다. 따라서 이에 대한 대안으로 배터리가 필요 없는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술이 주목받고 있다. 에너지 하베스팅은 주변에서 버려지는 에너지를 수확하여 전기 에너지로 바꾸어 사용하는 기술이다. 주변의 자연적인 에너지를 수확하여 사용하기 때문에 다른 발전 방법에 비하여 친환경적이면서 편의성과 안전성이 높다는 특징이 있다. 따라서 에너지 하베스팅은 늘어나는 소형, 무선 전자기기의 전원 공급 문제를 해결할 수 있는 하나의 방법으로써 관련한 연구가 여러 분야에서 활발히 진행되고 있다.

그중에서도 마찰전기 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)는 물리적인 진동이나 마찰력으로 인해 발생하는 기계적 에너지를 정전기 유도 현상을 통해 기전력을 발생시켜 전기적 에너지로 바꾸는 신개념의 친환경 에너지 하베스팅 기술 중 하나이다^{[1],[2]}. 이러한 TENG는 소형화와 경량화에 용이하고 유연한 플렉서블 필름 소재를 이용하기 때문에 웨어러블 디바이스의 구동이나 저전력 센서 구동에 적합하다는 장점으로 여러 분야에서 각광받고 있다. 마찰전기 기반의 에너지

Paper number: TKPE-2020-25-4-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jhjung@unist.ac.kr, School of Electrical & Computer Engineering, UNIST

Tel: +82-52-217-2140 Fax: +82-52-217-2109

¹ School of Electrical & Computer Engineering, UNIST
Manuscript received Jan. 23, 2020; revised Feb. 13, 2020;
accepted Mar. 14, 2020

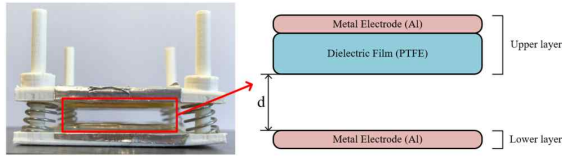


Fig. 1. Structure of a triboelectric nanogenerator.

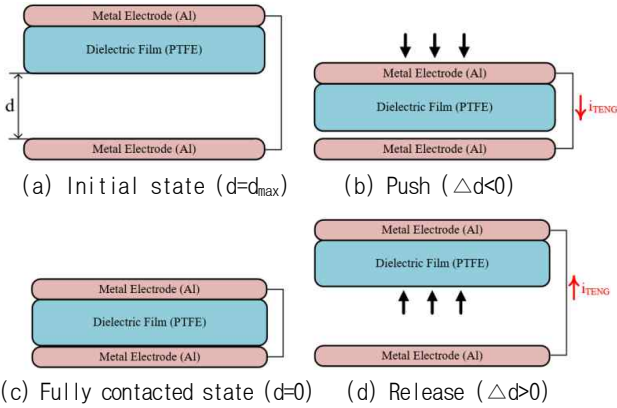


Fig. 2. Operational principles of TENG.

하베스팅 기술이 학계에 보고된 이후로 수직 접촉, 수평 접촉, 슬라이딩 모드 등 다양한 TENG의 구동 방식이 개발되었다^{[3],[4]}. 또한 TENG에 사용되는 양전하 대전체와 음전하 대전체에 대한 소재 연구와 더불어 마찰에 유리한 기계적 구조에 대하여 기계 분야에서도 많은 연구가 수행되었다.

현재까지 수 μW 에서부터 수 mW 정도의 전력을 생산할 수 있는 TENG들이 연구되어왔고, 출력된 전력을 이용한 배터리 충전이나 센서 구동, WSD, 그리고 무선 통신 전자기에 TENG가 에너지원으로 사용되는 응용이 활발하게 입증되었다^{[5]-[7]}. 하지만 이제까지 대부분의 TENG에 대한 연구는 소자의 구동방식, 구조 및 소재 관련 연구와 분석에 대해 집중되어 있었고, 전력 전달 관점이나 전력 변환 시스템에서의 TENG에 대한 분석은 다른 분야에 비해 미비한 편이다.

최근 몇 년간 TENG의 전력을 효과적으로 변환하기 위한 연구들이 진행되었다. 변압기를 이용하여 TENG의 전압과 입력 임피던스를 조절하는 방식의 전력관리 연구가 존재하지만 변압기의 설계 방식이나 변압기에서의 손실 전력 등에 관한 자세한 분석 및 정보가 기술되어 있지 않았다^[8]. 또한, 비교기와 같은 능동 소자를 이용하여 벡 컨버터를 응용한 전력 시스템을 구성한 연구도 보고되었으나, 능동소자의 구동에 TENG에서 생산한 전력이 사용되었는지, 외부 전력이 사용되었는지, 그리고 능동 소자의 사용으로 인한 전력 손실 등에 대한 분석이 부족하다는 문제점이 있다^[9]. 따라서 TENG를 에너지원으로서 사용하여 응용 분야에서 높은 전력 전달 효율로 구동하기 위해서는 전기 혹은 전력 관점에서의 발전 특성에 대한 분석을 통해 접근하여 전력 관리 시스템을 구성하는 것이 필수적이다.

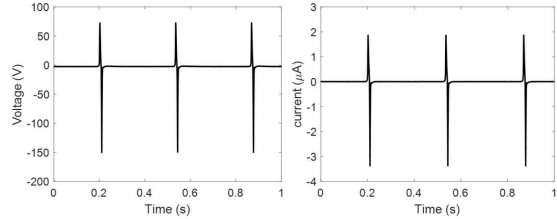


Fig. 3. Voltage and current waveforms of TENG.

본 논문에서는 TENG의 동작 원리와 전압, 전류의 특성을 고려하여 TENG에 연결되는 3단계로 구성된 전력 관리 시스템을 제안한다. 그리고 제안한 TENG의 3단계 전력 관리 시스템에서의 적절한 AC/DC 정류기와 DC/DC 컨버터의 선정 방법에 대해 제안하고, 마지막으로 임피던스 커플러의 역할과 필요한 이유, 커패시터 뱅크의 커패시터 용량 설정에 대하여 논의하고자 한다. 최종적으로 제안한 TENG의 3단계 전력 관리 시스템을 통해 TENG의 전력을 효과적으로 저장하고, 사용할 수 있는지에 대해 검증하고 이를 이용하여 적용할 수 있는 응용 분야에 대해서도 기술하고자 한다.

2. 마찰전기 나노발전기의 동작 원리

그림 1은 TENG의 기본 구조를 나타낸다. TENG의 상부층은 금속 물질의 전극과 유전체를 부착시켜 놓은 형태로 이루어져 있고, 하부층은 금속 전극으로만 이루어져 있다. 금속 전극이 다른 유전체에 비해 양전하가 잘 대전되는 특징을 이용하여, 상부층에 유전체 물질로는 음전하 대전체를 사용한다. 따라서 그림 2와 같이 상부층과 하부층이 접촉과 분리를 통해 마찰을 반복하면 정전기 유도 현상에 의하여 상부층의 유전체에는 음전하가, 하부층의 금속에는 양전하가 대전되도록 한다.

결과적으로 두 전극 사이에는 전하 밀도 차이가 생성되어 전극 사이를 전선으로 연결하면 전류가 흐르는 원리로 동작하게 된다. 두 층 사이의 거리를 d 라고 했을 때, d 가 감소할 때와 증가할 때 각각 다른 전기적 특징을 나타낸다. 두 층 사이의 거리가 좁혀질 때 상부층과 하부층이 접촉되면서 상부층은 음전하로, 하부층은 양전하로 대전되어 전류가 아래에서 위로 흐르게 된다. 전류가 흐른 뒤 상부층과 하부층이 완전히 접촉된 평형상태에서 다시 접촉이 멀어지면 상부층의 전극과 하부층의 전극 사이 전하밀도 차에 의해 전류가 아래에서 위로 흐르게 된다. 마찰을 지속적으로 일으키면 그림 2의 (a)~(d)의 과정을 반복하며 TENG가 펄스성의 AC 전압 전류 파형을 생성한다. 그림 3은 TENG를 3 Hz의 마찰로 동작했을 때 발생하는 전압과 전류의 파형이다.

마찰전기 나노발전기는 수백 V의 큰 전압을 생산해내는 전압원이지만 내부 임피던스를 거의 가지지 않는 다른 에너지원들과 비교했을 때 수 $\text{M}\Omega$ 단위의 큰 내부임피던스^{[10]-[12]}를 가지기 때문에 결과적으로 μW (마이크로

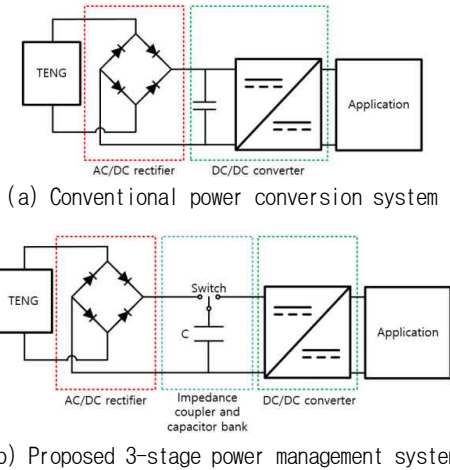


Fig. 4. Conventional power conversion system and proposed 3-Stage power management system of TENG.

와트) 단위의 미소 전력을 생산하게 된다. 따라서 내부 임피던스가 존재하는 TENG의 특성을 고려하여 전력을 최대한 전달하기 위해서는 전력 변환 시스템 설계 시 임피던스를 고려하여 설계할 필요가 있다.

3. 제안하는 마찰전기 나노발전기의 3단계 전력 관리 시스템

3.1 기존 전력 변환 장치와 제안하는 3단계 전력 관리 시스템의 구성

기존의 전력 변환 장치의 구성은 그림 4-a와 같다. 기존 전력 변환 장치는 TENG의 펄스성 전압 파형을 DC 형태로 바꾸어주기 위한 AC/DC 정류기, 그리고 특정 전압으로 변환하기 위한 DC/DC 컨버터로 구성되어 있다. 기존의 전력 변환 시스템에서는 전원단인 TENG의 내부 임피던스가 고려되지 않아 DC/DC 컨버터의 입력력으로 들어오는 전력량이 실제로 TENG가 생산한 전력량에 크기 못 미치는 문제가 발생한다.

제안하는 전력 관리 시스템은 TENG의 임피던스 커플러 스위치를 이용한 3단계의 구성을 가지고 있으며, 이는 그림 4(b)와 같다. 전압 정류를 위한 AC/DC 정류기, 임피던스 커플링을 위한 기계식 스위치와 커패시터 बैं크, 그리고 DC/DC 컨버터의 3단 직렬 시스템으로 이루어져 있다. 제안하는 전력 관리 시스템도 마찬가지로 TENG의 전압 파형이 AC 형태인 특징을 가지기 때문에 센서나 특정 웨어러블 어플리케이션을 구동하기 위해서는 다이오드 브리지 AC/DC 정류기를 통해 전압을 DC 형태로 평활하게 만들어준 뒤 커패시터 बैं크에 에너지를 저장한 후, DC/DC 컨버터를 통해 최종적으로 어플리케이션의 요구 전압에 맞춰주어야 한다.

기존 전력 변환 장치와 제안하는 3단계 전력 관리 시스템은 AC/DC 정류기와 DC/DC 컨버터 사이에 위치하는 커패시터에서 큰 차이가 있다. 먼저, 기존 전력 변환

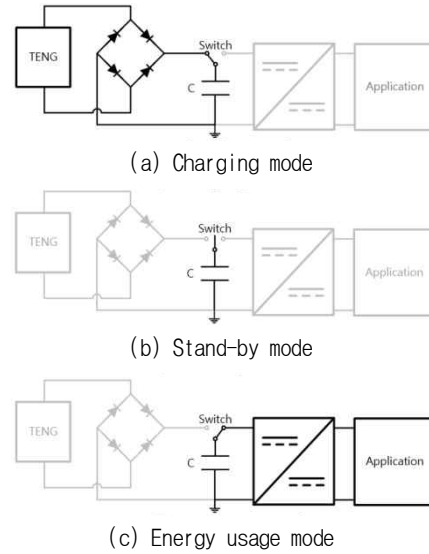


Fig. 5. Operational modes of 3-stage power management system for TENG.

장치의 커패시터는 DC/DC 컨버터의 입력 전압의 리플을 잡아주는 역할을 하고, 주로 nF~ μ F 단위의 용량을 사용한다. 반면에, 제안하는 3단계 전력 관리 시스템의 커패시터는 TENG에서 생산하는 에너지를 저장하는 역할을 하기 때문에 mF 이상의 큰 용량을 가지는 커패시터나 슈퍼커패시터를 사용한다. 이러한 이유로 두 시스템에서의 커패시터는 그 용량과 쓰임새가 크게 다르다.

제안하는 임피던스 커플러 스위치를 이용한 3단계 전력 관리 시스템의 기본 동작원리는 그림 5와 같다. 먼저 첫 번째 충전 모드에서는 임피던스 커플러 스위치를 이용하여 TENG와 AC/DC 다이오드 정류기에 커패시터 बैं크를 연결시키고, 뒷 단의 DC/DC 컨버터는 전원단에서 분리한다. 충전 모드에서는 TENG에서 생산된 전력이 AC/DC 정류기를 거쳐 커패시터 बैं크를 충전한다. 두 번째 대기 모드는 양쪽 모든 회로를 단락시켜 커패시터 बैं크만 분리되어 있게 한다. TENG에서 전력을 생산하여 커패시터에 에너지가 저장되어 있지만 어플리케이션에서 전력을 사용하지 않을 때, 커패시터에 저장된 에너지의 방전을 최소화하기 위한 대기 모드이다. 마지막으로 세 번째 모드인 에너지 전달 모드이다. 스위치를 에너지 전달 모드로 전환하면 커패시터 बैं크와 DC/DC 컨버터 그리고 어플리케이션의 회로가 연결되어 부하에 전력을 공급할 수가 있다. 제안하는 시스템은 TENG로 충전시킨 커패시터 बैं크의 에너지 사용을 원할 때마다 스위치를 에너지 사용 모드로 전환하여 어플리케이션에서 전력을 선택적으로 사용할 수 있게 하는 방식이다.

3.2 기존 전력 변환 장치와 3단계 전력 관리 시스템의 임피던스 분석 및 비교

3.2장에서는 TENG에 기존의 전력 변환 시스템을 적용하기 힘든 이유에 대하여 임피던스 모델링을 통해

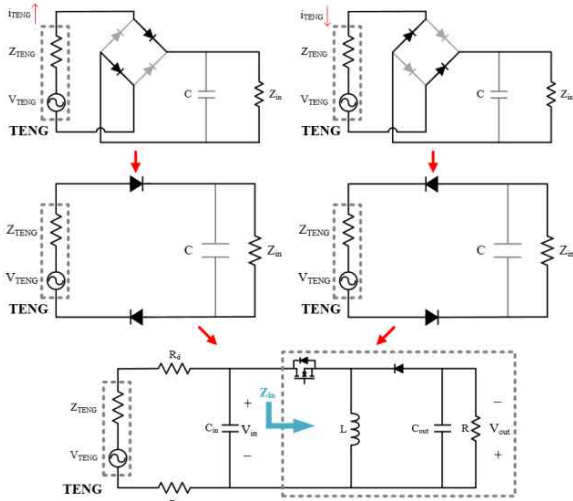


Fig. 6. Impedance modeling process of conventional power conversion system for TENG.

분석한 후 제안하는 3단계 전력 관리 시스템의 임피던스 커플러 스위치의 역할에 대하여 연결 지어 설명하고자 한다. 그림 6은 기존 전력 변환 장치의 임피던스 모델 회로이다. TENG의 등가 회로는 전압원과 내부 임피던스를 가진 형태로 기술할 수 있다. 일반적인 전력 변환 장치는 TENG의 전압 정류기를 위한 AC/DC 정류기, 커패시터, 그리고 DC/DC 컨버터를 연결하고 있다.

DC/DC 컨버터의 입력 임피던스를 Z_{in} 이라고 하고 기존 전력 변환 시스템의 임피던스 모델링을 하면 그림 7과 같다. 마찰전기 나노발전기에서 발생하는 전류는 다이오드 브리지 정류기를 지날 때 같은 종류의 다이오드를 양 단으로 하나씩 지나게 된다. 따라서 그림 6과 같이 임피던스 해석을 위해 전류가 도통되는 정류기의 다이오드를 하나의 저항(R_d)으로 모델링하였고, 전류가 도통되지 않는 정류기의 다이오드는 개회로로 보았다. 전류가 도통되는 다이오드가 TENG의 양 단에 각각 직렬로 하나씩 연결되어있는 형태이고, 그 뒤로 커패시터와 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스가 출력 부하로서 병렬로 연결되어있다. 출력 부하로는 DC/DC 컨버터가 바로 연결되어 있기 때문에 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스를 의미한다. 또한 정상상태에서의 해석이기 때문에 다이오드 정류기에 연결된 커패시터(C_{in})의 임피던스는 무한대로 가정한다.

기존 전력 변환 장치에서의 AC/DC 정류기와 DC/DC 컨버터 사이에 존재하는 커패시터(C_{in})는 이후에 연결될 DC/DC 컨버터의 입력 전압의 리플을 조절해주는 역할을 한다. 다이오드 정류기를 거쳐 DC로 정류된 전압(V_{in})과 출력 저항(Z_{in})을 이용하여 회로에 흐르는 전류(i_d)의 값을 도출한다. 다이오드에 전류가 흐르면서 다이오드의 순방향 전압강하(V_d)만큼 전압이 걸리기 때문에 이를 이용하여 다이오드의 저항(R_d)을 계산해주면 식 (1)과 같다.

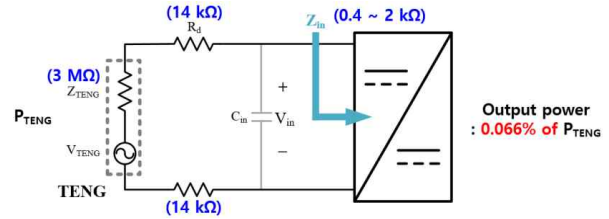


Fig. 7. Power transfer ratio of conventional power conversion system of TENG.

$$R_d = \frac{V_d}{i_d} = \frac{V_d}{\frac{V_{in}}{Z_{in}}} = \frac{V_d}{V_{in}} \times Z_{in} \quad (1)$$

다이오드 정류기의 임피던스 모델링과 전압 분배 법칙을 통해 출력 부하(Z_{in})에 전달되는 전력(P_{in})의 값을 구해보면, 식 (2)와 같이 도출된다.

$$P_{in} = \frac{V_{in}^2}{Z_{in}} = \frac{Z_{in}}{(Z_{TENG} + 2R_d + Z_{in})^2} \times V_{TENG}^2 \quad (2)$$

TENG에서 생산되는 전력을 P_{TENG} 라고 하면, 식 (3)과 같이 정리할 수 있고, 출력 부하에 전달되는 전력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{TENG} = \frac{V_{TENG}^2}{Z_{TENG} + 2R_d + Z_{in}} \quad (3)$$

$$P_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{TENG} + 2R_d + Z_{in}} \times P_{TENG} \quad (4)$$

결과적으로 다이오드 정류기의 임피던스 모델링을 통해 출력 부하(R_d)에 최대 전력을 전달하기 위해서는 최대 전력 전달 이론(Maximum power transfer theory)에 의하여 TENG의 내부 임피던스와 직렬로 연결된 다이오드 정류기의 임피던스의 합이 출력 부하와 같을 때, 즉 $Z_{TENG} + 2R_d = Z_{in}$ 의 관계일 때, TENG가 생산하는 전력의 최대 50%까지 출력을 부하에 전달이 가능하다. 또한 식 (3)을 통해 TENG의 내부 임피던스와 다이오드 정류기의 임피던스가 작을수록 생산 전력은 증가하기 때문에 TENG의 내부 임피던스 감소와 임피던스가 작은 다이오드 정류기를 사용하는 것이 최대 전력 전달에도 유리하다는 것을 알 수 있다. 임피던스가 작은 다이오드 정류기는 곧 다이오드 순방향 강하 전압(V_d)이 더 낮은 다이오드를 의미하기 때문에 다이오드의 순방향 전압강하가 작은 다이오드 정류기를 선정하는 것이 TENG의 최대 전력 전달에 유리하다고 할 수 있다.

앞서 모델링한 TENG와 AC/DC 정류기의 임피던스 회로 모델에 연결된 DC/DC 컨버터의 임피던스 모델을 그림 7에 나타내었다. 본 논문에서는 넓은 입력 전압을 가진 DC/DC 컨버터의 사용을 위해 벅-부스트 컨버터를

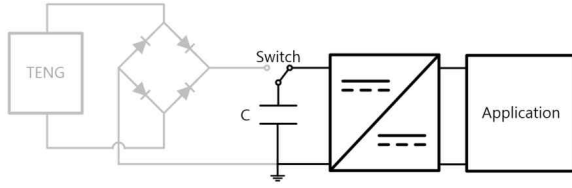


Fig. 8. Circuit schematic in energy usage mode.

이용하여 임피던스 모델링을 진행하였다. 정상상태에서의 임피던스 근사화를 위해 대신호 모델을 기반으로 모델링하였기 때문에 벡 컨버터나 부스트 컨버터 등 다른 종류의 DC/DC 컨버터의 임피던스 모델링에도 본 논문의 방법을 적용할 수 있다. TENG에 적용된 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스(Z_{in})를 대신호 모델 기반으로 해석하여 수식으로 정리하면 식 (5)와 같다.

$$Z_{in} = \frac{V_{in,avg}}{i_{in,avg}} = \frac{V_{in,avg}^2}{P_{in,avg}} = \frac{\eta \cdot V_{in}^2}{P_{out}} \quad (5)$$

DC/DC 컨버터의 입력 임피던스(Z_{in})는 컨버터의 입력 전압(V_{in}), 출력 전력(P_{out}) 그리고 컨버터의 효율(η)을 이용하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 여기서의 출력 전력(P_{out})은 최종 어플리케이션 동작이 필요로 하는 전력을 뜻한다.

앞서 모델링한 기존 전력 변환장치의 임피던스 분석에 실제 값들을 대입하여 임피던스의 매칭이 이루어지는지 살펴본다. 본 연구에서 사용하는 TENG의 내부 임피던스는 $3M\Omega$ 정도의 값을 가진다. 그리고 식 (1)에 측정값을 대입하여 정류기의 모델링 임피던스 값을 계산하면 하나의 다이오드는 $14k\Omega$ 의 임피던스를 가짐을 확인할 수 있다. 그렇다면 이론적으로 식 (4)의 관계를 통하여 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스 값이 TENG의 내부 임피던스와 다이오드 정류기의 임피던스 모델링 값의 합인 $3.028M\Omega$ 이 될 때, TENG에서 생산하는 전력의 최대를 출력 부하에 전달할 수 있다.

그리고 그림 7과 같이 DC/DC 컨버터의 가능 입력 임피던스를 예상하여 전력 전달이 가능한지 분석한다. 센서 및 데이터 전송 어플리케이션을 구동한다고 가정했을 때, TENG의 전력 변환 시스템 뒤에 어플리케이션 부하로 MCU(Micro-controller Unit), 저전력 센서, 그리고 low-power 블루투스가 차례로 연결된다. MCU의 요구전압은 2.8V를 기준으로 하였고, MCU, 센서 그리고 블루투스의 총 소비전력은 50mW로 계산하였다. 그리고 5V 정도의 입력 전압과 80%의 효율을 가지는 DC/DC 컨버터가 동작한다고 가정하면, DC/DC 컨버터의 입력 임피던스는 약 400Ω 정도로 구해진다. 또는 10mW 정도의 소비 전력을 가지는 e-paper와 같은 낮은 소비 전력의 어플리케이션으로 계산했을 때의 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스는 약 $2k\Omega$ 정도로 구해진다. 종합해봤을 때, DC/DC 컨버터의 임피던스는 $400\Omega \sim 2k\Omega$ 정도의 값

을 가지는 것을 알 수 있다. DC/DC 컨버터가 최대 가질 수 있는 임피던스인 $2k\Omega$ 라고 가정하고, 이를 바탕으로 기존 전력 전달 시스템에서의 전력 전달비를 구해보면, 식 (6)과 같고, 그림 7을 통해 알 수 있다.

$$\frac{P_{in}}{P_{TENG}} = \frac{Z_{in}}{Z_{TENG} + 2R_d + Z_{in}} = \frac{2k}{3M + 14k + 2k} = 0.00066 \quad (6)$$

결과적으로 출력단과 TENG의 내부 임피던스의 1000배 이상의 차이로 인해 기존의 전력 변환 장치로는 TENG의 생산 전력을 전달하는 것이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

압전소자 발전기(Piezoelectric generator)도 TENG와 유사한 펄스성의 전압, 전류를 생산하지만 내부 임피던스가 $k\Omega$ 단위이므로 $M\Omega$ 수준의 내부 임피던스를 가지는 TENG에 비해 일반적인 전력 변환 시스템의 적용이 보다 수월하다. 하지만 마찰전기 나노발전기는 $M\Omega$ 수준의 내부 임피던스를 $k\Omega$ 수준으로 낮추거나 생산 전력을 100~1000배 정도 높이는 것이 현재로는 소재 및 구조적 한계에 있기 때문에 일반적인 전력 변환 시스템을 연결하여 사용할 경우 임피던스의 불균형으로 인해 효과적인 전력 전달이 어렵다. 따라서 제안하는 전력 관리 시스템처럼 기계식 스위치를 이용하여 회로적으로 끊어서 임피던스의 영향을 차단해야 TENG의 내부 임피던스 영향을 최소화할 수 있고, TENG에서 생산되는 에너지를 가장 효과적으로 사용할 수 있다.

4. TENG를 위한 3단계 전력 관리 시스템의 설계 및 고려사항

4장에서는 제안하는 3단계 전력 관리 시스템의 효율적인 설계를 위한 AC/DC 정류기와 커패시터 뱅크의 용량, 임피던스 커플러 스위치, 그리고 DC/DC 컨버터 각 부의 선택 기준과 방법에 대하여 기술하고자 한다.

4.1 AC/DC 다이오드 정류기의 선정

앞서 3.2장에서 제시한 3단계 전력 관리 시스템과 기존의 전력 변환 장치를 비교하는 부분에서 임피던스 해석을 이용하여 정류기를 설계하는 방법으로 접근하였다. AC/DC 다이오드 정류기를 임피던스에 대하여 모델링 하였을 때, TENG의 양 끝 단에 직렬로 임피던스를 가지는 저항이 된다. 제안하는 3단계 전력 관리 시스템에서도 임피던스 모델링 결과를 이용하여 다이오드의 임피던스가 작을수록, 다이오드의 순방향 전압강하가 작은 다이오드를 사용할수록 커패시터에 더 많은 에너지를 충전할 수 있어 유리하다.

4.2 임피던스 커플링 스위치의 사용

임피던스 커플링 스위치는 수동적으로 동작시키는 기계적 스위치를 적용하였다. 아직 TENG에서 생산되는

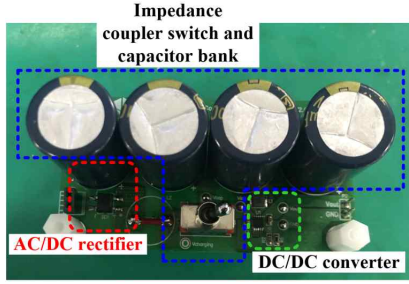


Fig. 9. Hardware prototype of proposed 3-stage power management system of TENG (40 mm×74 mm×45 mm).

TABLE I
PARAMETER OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR

Parameter	Value
Area	49×10^{-4} [m ²]
Permittivity of freespace	8.854×10^{-12} [F/m]
Relative permittivity of the dielectric (PTFE)	2.1
Thickness of dielectric	25×10^{-6} [m]
Charge surface density	300×10^{-6} [C/m ²]
Operating frequency	3 Hz

전력량이 μW 수준이기 때문에 릴레이나 전력반도체로 이루어진 스위치를 자동적으로 제어 및 동작시키기에는 에너지가 충분치 않기 때문이다. 하지만 스위치가 없이 AC/DC 부분과 DC/DC 컨버터 부분을 연결한다면 앞서 3.2장에서 분석한 바와 같이, 100~1000배 이상의 임피던스 불균형으로 인하여 전력 전달이 어렵기 때문에 전력 시스템의 구동 자체가 불가능하다. 따라서 TENG와 AC/DC 정류 부분, 그리고 DC/DC 컨버터 부에 대한 임피던스 영향을 차단하기 위한 스위치는 반드시 필요하므로 수동적 기계식 스위치를 적용하는 것이 현재로서는 TENG 응용에 가장 효과적이다.

4.3 커패시터 बैं크 및 DC/DC 컨버터의 선정

그림 8은 에너지 사용 모드에서 3단계 전력 관리 시스템의 회로도를 나타낸다. 커패시터 बैं크에 저장되는 에너지는 뒷 단의 DC/DC 컨버터와 어플리케이션을 원하는 시간 동안 동작시킬 정도로 충분해야 한다. 따라서 어플리케이션의 동작에 필요한 시간과 이에 따른 소비전력을 고려하여 커패시터 बैं크의 용량을 선정해야 한다. 식 (7)은 커패시터 बैं크의 용량 선정에 대한 수식을 나타낸다.

$$\frac{1}{2} C (V_{\max}^2 - V_{\min}^2) \geq \frac{P_{app}}{\eta} \times t \quad (7)$$

여기서 C 는 커패시터 बैं크의 용량, P_{app} 는 어플리케이션의 소비전력, η 는 컨버터의 효율, t 는 어플리케이션의

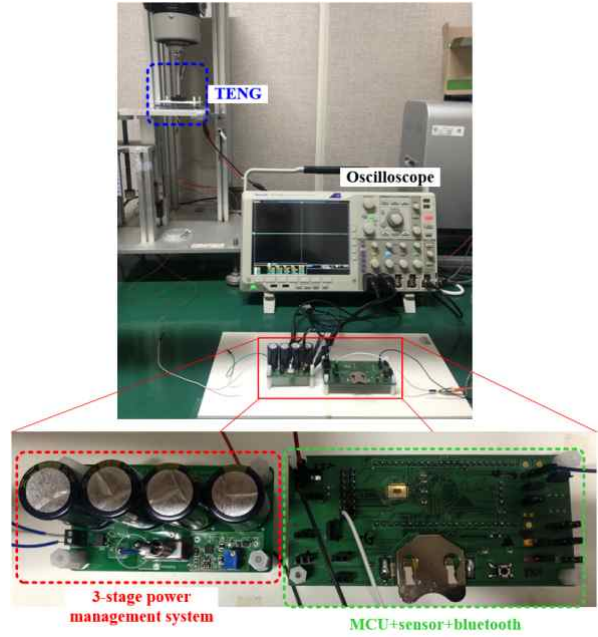


Fig. 10. Experimental set up for operating verification.

동작 시간, 그리고 V_{\max} , V_{\min} 은 DC/DC 컨버터의 최대, 최소 입력 전압을 나타낸다. 커패시터에 저장되는 에너지는 DC/DC 컨버터와 어플리케이션의 총 소비전력과 동작 시간의 곱보다 크도록 선정해야 한다. 이를 커패시턴스로 정리하여 식 (8)을 통해 3단계 전력 관리 시스템의 적절한 커패시터 बैं크의 용량을 선정할 수 있다.

$$C \geq 2 \frac{P_{app}}{\eta (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)} \times t \quad (8)$$

또한 커패시터 선정 시 중요하게 고려해야 할 것은 커패시터의 등가 직렬 저항(Equivalent Series Resistance; ESR)이다. 충전 모드나 에너지 사용 모드일 때 커패시터의 ESR이 크면, 커패시터에 흐르는 전류와 ESR의 크기에 따라 ESR에서 손실되는 전력도 커지기 때문에, 충전이 느려지거나, 어플리케이션이 동작할 수 있는 시간이 줄어들 수 있다. 또한, ESR이 크면 출력 전압의 리플도 커지기 때문에 DC/DC 컨버터의 입력에 좋지 않은 영향을 준다. 따라서 작은 ESR을 가진 커패시터를 선정하여 사용할수록 3단계 전력 관리 시스템 동작 시 전력 소모가 줄어들고, 뒷단에 연결되는 DC/DC 컨버터의 입력 전압도 리플이 줄어들기 때문에 유리하다. ESR의 영향을 더 줄이기 위해 병렬로 여러 개의 커패시터를 사용하는 방법도 함께 고려할 수 있다.

DC/DC 컨버터의 선정 또한 어플리케이션 구동 시간에 큰 영향을 끼친다. 식 (7)에서 보이는 바와 같이 DC/DC 컨버터의 최소 입력 전압 V_{\min} 과 최대 입력 전압 V_{\max} 값의 차이에 따라 어플리케이션의 구동 시간이 영향을 받는다. 따라서 같은 용량의 커패시터 बैं크에 저장된 에너지로 더 오랜 시간 어플리케이션을 구동하기

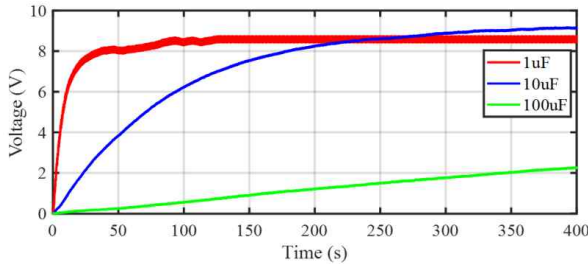


Fig. 11. Charging voltage waveform with various capacitance using TENG.

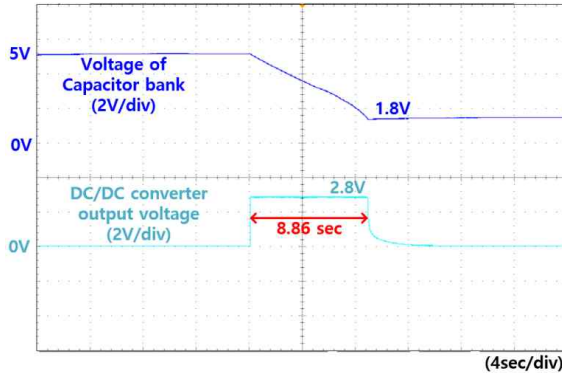


Fig. 12. Voltage of capacitor bank and output voltage of DC/DC converter in energy usage mode.

위해서는 입력 전압의 범위가 상대적으로 넓은 벡-부스트 컨버터가 단일 벡 컨버터나 부스트 컨버터보다 유리하다고 할 수 있다. 그리고 IC(Integrated circuit) 형태로 집적된 컨버터를 사용하면 컨버터의 구동에 사용되는 소비 전력이 Discrete 소자를 사용한 컨버터에 비하여 더 적기 때문에 더 오랜 시간 어플리케이션을 구동할 수 있다.

5. 실험 및 실험 결과

제안하는 마찰전기 나노발전기의 3단계 전력 관리 시스템의 동작을 검증하기 위해 전력 관리 시스템의 하드웨어 프로토타입을 제작하여 실험을 수행하였다. 그림 9는 3단계 전력 관리 시스템 시제품과 부하를 연결한 모습을 보여준다. TENG에 제안하는 3단계 전력 관리 시스템을 연결하고 그 뒤에 부하로는 MCU, 심박센서, 블루투스 사용하였다.

실험에 사용한 마찰전기 나노발전기의 파라미터는 표 1과 같다. TENG 제작에 사용된 유전체 소재의 종류는 PTFE(Polytetrafluoroethylene)이고, 금속 소재는 알루미늄 필름을 사용하였다. 그리고 본 실험에서의 부하는 50mW 정도이므로 5초 이상 동작시키기 위해 40mF를 커패시터 बैं크의 용량으로 설정하였다. 40mF의 커패시터 बैं크는 식 (8)을 이용하여 이론적으로 계산했을 때, 50mW의 부하를 약 8.7초 정도 동작시킬 수 있는 용량이다. DC/DC 컨버터 동작에서의 커패시터 बैं크의 ESR

에 의한 영향을 최소화하기 위해 10mF의 커패시터를 병렬로 4개를 연결하여 40mF 용량의 커패시터 बैं크가 되도록 설계하였다. 이는 커패시터의 ESR에 의한 손실을 최소화해야 미소전력을 포집하는 데 있어 유리하기 때문이다. 따라서 대용량에 유리하지만 큰 ESR 값을 가지는 슈퍼 커패시터나, 작은 ESR 값을 가지지만 용량이 작은 세라믹 커패시터를 사용하는 대신 전체 커패시터를 사용하였다. 본 연구에서는 ESR에 의한 전력 손실을 최소화하기 위하여 15mΩ의 낮은 ESR 값을 가지는 10mF의 커패시터를 선정하여 4개를 병렬로 연결하여 사용하였다.

제작한 하드웨어 프로토타입을 이용하여 실험을 진행하였다. TENG를 제작한 프로토타입에 연결하고, MCU, 심박센서, 블루투스를 부하로 연결하였다. 그리고 임피던스 커플러 스위치를 충전 모드로 위치하여 커패시터 बैं크에 5V까지 충전하였다. 본 실험에서 사용한 TENG의 생산 전력 수준이 10~100μW 정도이기 때문에 3Hz 정도의 구동으로는 40mF 커패시터 बैं크에 5V 충전까지 시간이 2시간 이상으로 오래 소요된다. 또한 TENG의 충전 시간은 TENG의 종류나 주변 습도 조건 등 외부 요인의 영향에 따라 가변적이고 예민하기 때문에 일반적인 충전 파형의 형태와는 차이가 있고, 실험 때마다 과도주기가 다르다. 이러한 이유로 과도구간이 긴 40mF의 충전 상태를 일반화할 수 없기 때문에 40mF의 전체 충전 파형 대신 커패시터 용량별 충전 전압 파형을 그림 11에 나타내었다. 커패시터 용량이 커질수록 과도구간이 길어지고, 전압 리플이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 커패시터가 변하더라도 최종 충전 전압의 값이 8~9V로 비슷하게 얻어진다. 3Hz의 낮은 동작 주파수로 TENG를 구동하여 충전했기 때문에 충전 시간이 상대적으로 길지만, TENG의 동작 주파수를 증가시키거나, 기타 기계적 구조를 이용하여 동작 주파수를 빠르게 변화시켜주는 기어-캠(Gear-cam) 등을 적용하면 충전 속도를 더욱 향상시킬 수 있다.

에너지 사용 모드로 전환하여 DC/DC 컨버터와 부하가 커패시터 बैं크에 충전된 에너지를 이용하여 동작하는 것을 그림 12를 통해 확인할 수 있다. 이때의 외부 전원이나 배터리의 연결은 없으며, 커패시터 बैं크에 충전된 에너지만을 이용하여 DC/DC 컨버터, MCU, 심박센서와 블루투스가 모두 구동하였다. 커패시터 बैं크의 전압, 그리고 DC/DC 컨버터의 출력 전압 파형을 나타내었다. 커패시터 बैं크의 전압이 1.8V까지 사용되고, DC/DC 컨버터의 출력 전압이 2.8V로 레귤레이션되어 8.86초 정도를 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다. 목표 동작 시간을 8.7초 정도로 설계한 것과 비슷한 시간 동안 동작하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험을 통해 3단계 전력 관리 시스템의 정상적인 동작과 TENG로부터 생산된 전기에너지의 전력 변환을 통한 이용 가능성을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 마찰전기 나노발전기에서 생산되는 전력을 효과적으로 사용할 수 있는 3단계 전력 관리 시스템을 제안하였다. 기존에 널리 사용되는 전력 변환 장치가 TENG에 적용이 불가능한 이유를 임피던스 모델링을 기반으로 수식을 도출하고 이를 활용하여 설명하였다. 또한 제안한 3단계 전력 관리 장치의 각 부에서의 AC/DC 정류기, 커패시터 뱅크 그리고 DC/DC 컨버터의 선정 방법 또한 제시하였다. 제안한 전력 관리 시스템을 프로토타입으로 제작하여 각 모드의 동작을 확인하였고 TENG를 전력원으로 이용하여 구동 가능함을 확인하였다. 이를 통해 TENG 전력원에는 기존 전력 변환 장치의 적용 및 구동이 불가능했던 문제점을 본 논문에서 제안한 TENG의 3단계 전력 관리 시스템을 적용함으로써 충전과 에너지 사용 모드에서 어플리케이션 부하의 8.86초 정도 동작을 확인하여 타당성을 검증하였다.

본 연구는 삼성전자 미래기술육성센터의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. SRFC-TA1403-51)

References

- [1] Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - Principles, problems and perspectives," *Faraday Discuss.*, Vol. 176, pp. 447-458, 2015.
- [2] F. R. Fan, Z. Q. Tian, and Z. L. Wang, "Flexible triboelectric generator," *Nano Energy*, Vol. 1, pp. 328-334, 2012.
- [3] G. Zhu, B. Peng, J. Chen, Q. Jing, and Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications," *Nano Energy*, Vol. 14, pp. 126-138, May 2015.
- [4] S. Niu, Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y. S. Zhou, Y. Hu, and Z. L. Wang, "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators," *Advanced Materials*, vol. 25, pp. 6184-6193, 2013.
- [5] S. Wang, L. Lin, and Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerators as self-powered active sensors," *Nano Energy*, Vol. 11, pp. 436-462, 2015.
- [6] T. C. Hou, Y. Yang, H. Zhang, J. Chen, L. J. Chen, and Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerator built inside shoe insole for harvesting walking energy," *Nano Energy*, Vol. 2, No. 5, pp. 856-862, Sep. 2013.
- [7] S. J. Park, S. H. Lee, M. L. Seol, S. B. Jeon, H. Bae, D. Kim, G. H. Cho, and Y. K. Choi, "Self-sustainable wind speed sensor system with omni-directional wind based triboelectric generator," *Nano Energy*, Vol. 55,

pp. 115-122, 2019.

- [8] X. Cheng, L. Miao, Y. Song, Z. Su, H. Chen, X. Chen, J. Zhang, and H. Zhang, "High efficiency power management and charge boosting strategy for a triboelectric nanogenerator," *Nano Energy*, Vol. 38, pp. 438-446, 2017.
- [9] F. Xi, Y. Pang, W. Li, T. Jiang, L. Zhang, T. Guo, G. Liu, C. Zhang, and Z. L. Wang, "Universal power management strategy for triboelectric nanogenerator," *Nano Energy*, Vol. 37, pp. 168-176, 2017.
- [10] M. S. Rasel, P. Maharjan, M. Salauddin, M. T. Rahman, H. O. Cho, J. W. Kim, and J. Y. Park, "An impedance tunable and highly efficient triboelectric nanogenerator for large-scale, ultra-sensitive pressure sensing applications," *Nano Energy*, Vol. 49, pp. 603-613, 2018.
- [11] Y. Zhu, B. Yang, J. Liu, X. Wang, L. Wang, X. Chen, and C. Yang, "A flexible and biocompatible triboelectric nanogenerator with tunable internal resistance for powering wearable devices," *Sci Rep*, Vol. 6, 2016.
- [12] T. He, Q. Shi, H. Wang, F. Wen, T. Chen, J. Ouyang, and C. Lee, "Beyond energy harvesting - multi-functional triboelectric nanosensors on a textile," *Nano Energy*, Vol. 57, pp. 338-352, 2019.



윤보경(尹輔卿)

1993년 3월 19일생. 2018년 울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전기전자컴퓨터공학부 석사과정.



이준영(李準營)

1993년 5월 3일생. 2016년 서강대 전자공학과 졸업. 2016년~현재 울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 석·박통합과정.



정지훈(鄭智勳)

1977년 3월 2일생. 2000년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학). 2006년~2009년 삼성전자 책임연구원. 2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원. 2013년~현재 울산과학기술원(UNIST) 전기전자컴퓨터공학부 부교수. 당 학회 학술이사.