

마찰전기 나노발전기의 임피던스 분석을 통한 정류기의 최대 전력 설계

윤보경, 이준영, 정지훈
 울산과학기술원 (유니스트)

Maximum Power Design of Bridge Rectifier for Triboelectric Nanogenerator Using Impedance Analysis

Bo-Kyung Yoon, Jun-Young Lee, Jee-Hoon Jung
 Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

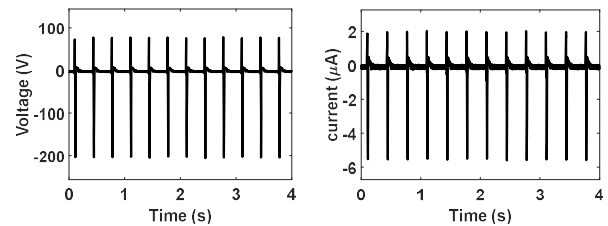
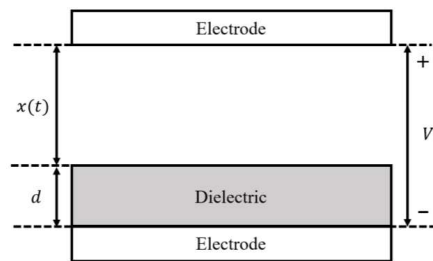
ABSTRACT

에너지 하베스팅은 주변의 에너지를 수확하여 활용하는 기술로 이에 관련한 연구가 여러 분야에서 활발히 진행되고 있다. 마찰전기 나노발전기는 물리적인 움직임이나 마찰을 통해 발생하는 정전기를 이용하여 센서나 웨어러블 디바이스에 활용하는 에너지 하베스팅 기술 중 하나이다. 마찰전기 나노발전기는 μW (마이크로와트) 단위의 미소 전력을 생산함에도 불구하고, 다른 에너지 하베스팅 발전기들과 비교하여 큰 임피던스를 가지고 있어서 전력을 전달하기에 어려움이 있다. 또한 마찰전기 나노 발전기의 출력 전력은 Spike성 Pulse Train의 형태여서 다이오드 정류기가 필요하기 때문에, 정류기의 입력 임피던스와 마찰전기 나노 발전기의 출력 임피던스에 대한 분석을 이용한 임피던스 매칭 설계가 필요하다. 본 연구에서는 다이오드 정류기의 임피던스 모델을 유도하여 마찰전기 나노 발전기의 내부 임피던스와의 매칭을 통해 최대 전력을 전달하는 커패시터와 출력 부하 설계를 목표로 한다. 유도한 임피던스 모델에 대하여 실제 전력 실험을 통해 모델의 유효성과 정확성을 검증하고자 한다.

1. 서론

최근 사물인터넷(IoT)에 대한 관심이 증가하면서 다양한 전자기기들이 전원적으로 독립되어 사용할 수 있도록 주변의 에너지를 수확하여 활용하는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술에 대한 연구가 여러 분야에 걸쳐 활발하게 이루어지고 있다. 그 중에서도 마찰전기 나노발전기 (Triboelectric Nanogenerator, TENG)는 물리적인 움직임이나 마찰을 통해 기전력이 발생하는 정전기 유도 현상을 이용한 에너지 하베스팅 기술 중 하나이다.^[1] 마찰전기 나노 발전기는 친환경적인 에너지원이면서 소형화와 경량화에 용이하다는 장점을 가져 저전력 센서의 구동과 웨어러블 디바이스에 응용이 가능하기 때문에 주목을 받고 있다.^[2]

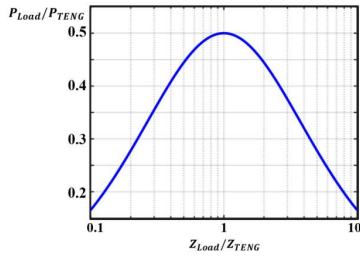
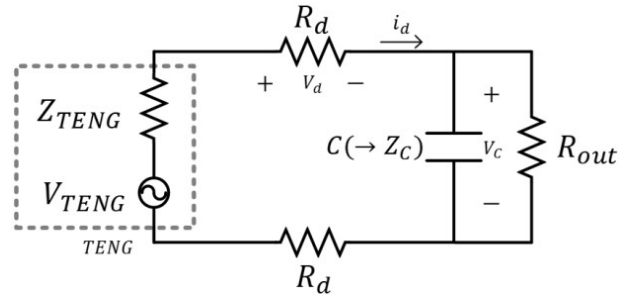
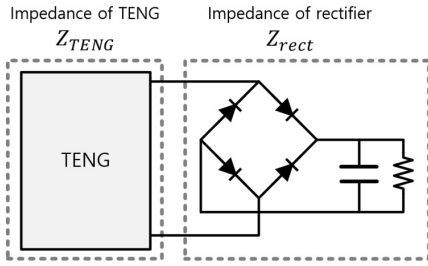
마찰전기 나노발전기의 기본 구성은 그림 1과 같다. 그림 1과 같이 상부 층과 하부 층이 서로 접촉과 분리를 반복하면 상부 층의 금속 전극과 하부 층의 유전체의 대전울 차이로 인해 정전기 유도 현상에 의하여 상부의 금속은 양전하로, 하부의 유전체는 음전하로 대전이 된다. 따라서 두 전극 사이에 전하 밀도 차이가 생겨 기전력을 발생시키고, 전극 사이를 전선으로 연결하면 전하 밀도 차이에 의해 전류가 흐르게 된다. 그림 2



는 마찰전기 나노발전기에서 생산되는 전압, 전류 특성을 보여 주고 있다. 마찰전기 나노발전기의 출력 전력은 Spike성 Pulse Train의 형태를 가진 AC 파형이므로 이를 여러 가지 센서나 웨어러블 디바이스에 전력원으로 활용하기 위해서는 AC/DC 정류가 반드시 요구된다.

또한 마찰전기 나노발전기는 μW (마이크로와트) 단위의 미소 전력을 생산함에도 불구하고, 다른 에너지 하베스팅 발전기들과 비교하여 수 ~ 수 백 M (메가 옴) 정도의 비교적 큰 내부 임피던스를 가지기 때문에 많은 전력을 전달하기에 어려움이 있다. 마찰전기 나노발전기에서 생산되는 전력을 최대한 정류하려면 마찰전기 나노발전기의 임피던스와 정류기 임피던스와의 매칭을 고려한 설계가 필요하다.

본 논문에서는 다이오드 정류기의 임피던스 모델을 유도하고, 마찰전기 나노 발전기의 내부 임피던스와의 매칭을 통해 최대 전력을 전달하는 커패시터와 출력 부하 설계를 제안한다. 또한 유도한 임피던스 모델과 설계한 커패시터와 출력 부하에 대하여 실제 실험을 통해 모델의 유효성과 정확성에 대하여 검증하고자 한다.



2. 마찰전기 나노발전기와 정류기의 최대 전력 설계

2.1. 마찰전기 나노발전기와 정류기 임피던스 매칭

마찰전기 나노발전기와 정류기는 그림 3과 같이 연결된다. 마찰전기 나노발전기의 Pulse성 파형을 DC 형태로 평활화하기 위하여 다이오드 브리지 정류기와 커패시터, 그리고 출력 부하를 연결한다. 최대 전력을 출력 부하에 전달하기 위해서는 임피던스 매칭 원리에 의해서 마찰전기 나노발전기의 출력 임피던스와 정류기 뒷단의 입력 임피던스가 같아야 한다. 따라서 그림 4와 같이 마찰전기 나노발전기의 임피던스()와 다이오드 정류기 뒷단의 임피던스()가 같을 때, 최대 전력 전달 이론(Maximum Power Transfer Theory)에 의하여 마찰전기 나노발전기의 생산 전력의 최대 50%를 전달할 수 있다.

마찰전기 나노발전기와 정류기 뒷단의 임피던스를 이용하여 정류기 뒷단에 최종 전달할 수 있는 전력의 양은 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 마찰전기 나노발전기에서 생산하는 총 전력의 양을 라고 하면, 정류기를 통해 전달되는 전력의 양은 로 나타낼 수 있다.

(1)

(마찰전기 나노발전기의 임피던스)의 값은 정해져 있기 때문에, (정류기의 임피던스)를 마찰전기 나노발전기의 임피던스와 같게 되도록 모델링을 통해 설계한다면, 마찰전기 나노발전기의 생산 전력을 출력 부하에 최대 전달할 수 있을 것이다.

2.2. 정류기 다이오드 임피던스 모델링

마찰전기 나노발전기와 다이오드 정류기의 임피던스 모델은 그림 5와 같다. 마찰전기 나노발전기는 내부 임피던스와 전압

원으로 이루어져 있고, 다이오드 정류기는 전류가 통하고 있는 다이오드를 하나의 저항()으로 모델링 하였다. 정류기 뒷단에는 커패시터()와 출력 부하()가 연결되어 있다. 다이오드의 저항은 다이오드의 순방향 전압강하()와 다이오드에 흐르는 전류()의 값을 이용하여 구할 수 있다. 그리고 다이오드에 흐르는 전류()는 커패시터에 걸리는 전압()을 이용하여 구할 수 있고, 커패시터에 걸리는 전압()은 그림 5의 등가 회로의 임피던스를 이용하여 구해보면, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

(3)

식 (3)에서 구한 커패시터에 걸리는 전압()을 이용하여, 다이오드에 흐르는 전류()를 구해보면 식 (4)와 같이 모델링할 수 있다.

(4)

다이오드에는 다이오드의 순방향 전압강하()만큼의 전압이 걸리게 되므로, 최종적으로 다이오드의 저항()은 옴의 법칙에 따라 식 (5)로 구해질 수 있다.

(5)

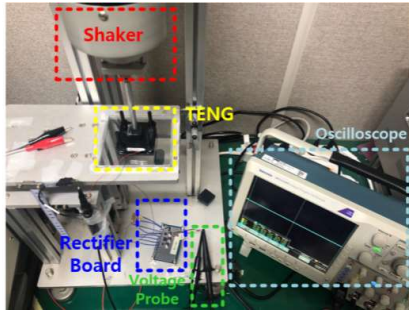
다이오드의 저항은 마찰전기 나노발전기에 직렬로 연결되어 있는 형태이고, 출력 부하()에 최대 전달 전력을 위해서는 다이오드에서의 전력 소모를 최소화해야 하기 때문에 정류기의 다이오드 모델링 저항()을 구해 그 값이 작을수록, 그리고 다이오드의 순방향 전압강하()가 큰 다이오드 정류기를 선정할수록 출력 단에 전달되는 전력의 크기는 커질 것으로 보인다.

2.3. 최대 전력 전달을 위한 커패시터와 출력 부하 설계

커패시터의 임피던스는 마찰전기 나노발전기의 구동 주파수와 커패시터의 크기()를 고려하여 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

(6)

그림 5와 같이 마찰전기 나노발전기와 정류기 뒷단에 커패시터와 출력 부하는 병렬로 연결되어 있기 때문에 커패시터와 출력



부하의 합성 임피던스는 식 (7)과 같다.

(7)

식 (7)을 통해 구한 커패시터와 출력 부하의 합성 임피던스와 식 (5)를 통해 구한 다이오드 정류기의 저항을 더해서 정류기 뒷단의 총 임피던스를 구할 수 있다. 정류기 뒷단의 총 임피던스는 식 (8)과 같이 정리할 수 있다. 따라서 정류기 다이오드의 모델링 저항과, 커패시터, 출력 부하의 임피던스는 식 (8)과 같은 관계식을 가진다.

(8)

구한 정류기 뒷단의 총 임피던스를 마찰전기 나노발전기의 내부 임피던스와 같게 되도록 설계하면 출력 단에 최대 전력을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 임피던스 매칭과 더불어 커패시터의 크기는 출력 전압 리플도 함께 고려하여 선정해야 한다. 출력 전압 리플을 V_{ripple} 라고 하면 리플을 고려한 커패시터 값 선정 수식은 식 (9)와 같다.

(9)

따라서 마찰전기 나노발전기의 내부 임피던스와, 출력 전압 리플을 함께 고려하기 위해 식 (8)과 식 (9)를 함께 고려하면 최적의 커패시터 값을 선정할 수 있다.

3. 모의 시험 및 실험 결과

제안하는 다이오드 정류기의 모델링을 통한 최대 전력 전달을 검증하기 위해 그림 6과 같이 실험 환경을 구성하였다. 마찰전기 나노발전기는 Aluminum과 PTFE(Teflon)을 이용하여 3 cm × 3 cm의 면적을 가지도록 제작하여 실험을 진행했다. ET-126B-4 의 진동 모터(Shaker)를 이용하여 3 Hz의 주파수로 마찰전기 나노발전기를 구동하며 마찰전기 나노발전기의 임피던스를 측정하였다. 측정 결과, 마찰전기 나노발전기는 약 80 ~ 90 M 사이의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 측정된 임피던스의 평균을 내어 85.07 M 를 마찰전기 나노발전기의 내부 임피던스 값으로 사용하였다.

앞서 설계한 정류기 임피던스 모델링을 위하여 커패시터에

정류기	SPV1001N30	CBRHDSH1-40L	MB8S
	2.869 [V]	9.612 [V]	8.216 [V]
	70 [mV]	360 [mV]	1 [V]
	14.21 [M Ω]	2.17 [M Ω]	8.16 [M Ω]
	0.205 [μW]	2.309 [μW]	1.687 [μW]

걸리는 전압을 측정하였다. 표 1에 나와있는 각 정류기들의 순방향 전압 강하() 값으로 정류기 다이오드 모델링에서 구한 식 (4)를 이용하여 각 정류기 다이오드의 저항 모델()을 도출한 결과를 나타내었다. 예상과 같이 정류기의 다이오드 모델링 저항 값이 작으면서, 순방향 전압 강하 값이 크면 최대 전력을 전달하는데 유리하다는 것을 실험적으로 보여주고 있다.

커패시터와 출력 부하는 정류기 뒷단에 달리는 전력 변환 장치 컨버터의 스펙에 따라 선정할 수 있다. 원하는 어플리케이션의 요구 전압으로 레귤레이션 하기 위해서는 전력 변환할 수 있는 DC-DC 컨버터의 사용이 요구된다. 따라서, 커패시터는 전력 변환 장치의 입력 전압 리플에 따라서 선정이 되어야 하고, 출력 부하는 DC-DC 컨버터의 입력 임피던스가 정류기 뒷단의 출력 임피던스가 되기 때문에 전력 변환 장치의 입력 임피던스를 고려하여 설계해야 한다. 출력 전압 레귤레이션을 위한 마찰전기 나노발전기의 전력 변환 장치는 현재 설계 중에 있다.

4. 결론

본 논문에서는 마찰전기 나노발전기의 임피던스 매칭을 위한 다이오드 정류기 모델링을 통해 다이오드의 임피던스를 근사화하여, 최대의 전력을 출력 단에 전달할 수 있는 최적의 다이오드 정류기의 임피던스를 유추하는 것이 가능함을 보였다. 또한 다이오드 정류기의 저항 모델링을 이용하여 최적의 커패시터와 출력 부하를 선정하기 위한 관계식을 도출하였다.

이 논문은 삼성전자 미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 SRFC-TA1403-51)

참고 문헌

- [1] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, Z. L. Wang, "Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era", *Advanced Energy Materials*, Vol.9, Issue. 1, pp. 1-25, 03, January, 2019
- [2] Z. Lin, J. Chen, X. Li, Z. Zhou, K. Meng, W. Wei, J. K. Yang, Z. L. Wang, "Triboelectric Nanogenerator Enabled Body Sensor Network for Self-Powered Human Heart-Rate Monitoring," *ACS Nano*, vol. 11, pp. 8830-8837, 2017