

통계적 시간-주파수 분석을 이용한 압전 에너지 수확 장치의 평균 전력 예측

Harvestable Electric Power Quantification of a Piezoelectric Energy Harvester using a Statistical Time-Frequency Analysis

윤헌준* · 윤병동† · 조철민**

Heonjun Yoon, Byung D. Youn and Chulmin Cho

1. 서 론

기계 시스템의 신뢰성과 안전성 향상을 위하여, 무선 센서 네트워크를 통한 고장 진단 및 예지 기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 하지만 원격으로 배치된 무선 센서의 배터리를 주기적으로 교체하는 것은 많은 어려움이 있기 때문에, 에너지 하베스팅을 이용한 자가 발전 기술이 최근 큰 관심을 받고 있다. 이 때, 주어진 진동 조건에 최적화된 에너지 수확 장치 설계, 부착 위치 및 수량 결정 등을 위해서는 변환 가능 전력을 사전에 예측하는 것이 중요하다. 그러나 실제 구조물에서 측정된 가속도 신호의 주파수와 진폭은 시간에 따라 랜덤으로 변하며, 이러한 변동은 전력 예측 모델의 정확도를 낮추는 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 비정상 랜덤 진동 하에서 압전 에너지 수확 장치로부터 변환 가능한 전력을 정량화하기 위하여, 1) 주어진 가속도의 시변 파워 스펙트럼 밀도 추정, 2) 전기-기계 모델 실행, 3) 전압 응답의 시변 파워 스펙트럼 밀도 추정으로 구성된 총 3단계의 통계적 해석 방법론을 제시한다.

2. 비정상 랜덤 진동의 시변 파워 스펙트럼 밀도

2.1 비정상 랜덤 진동 신호 모델링

본 연구에서는 식 (1)과 같이, Hilbert 변환을 이용하여 진폭과 주파수가 모두 불규칙하게 변조된

임의의 가속도 신호를 생성하였다 [1].

$$x(t) = \sum_r A_r(t) \cdot \cos\left[\int_0^t \omega_r(t) dt\right] \quad (1)$$

$A_r(t)$ 와 $\omega_r(t)$ 는 각각 그림 1과 같이 Gaussian 잡음에 의해 변조된 진폭과 순간 주파수이다.

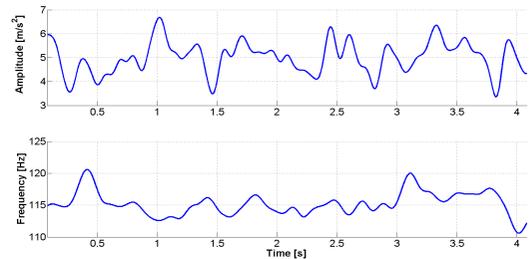


Fig. 1 Non-stationary random acceleration signal

2.2 Wigner-Ville 스펙트럼을 이용한 시변 파워 스펙트럼 밀도 추정

대표적인 곁선형 시간-주파수 분석 기법 중 하나인 Wigner-Ville 분포는 식 (2)와 같이 정의되며, 승법 잡음에 의해 변조된 진폭 또는 선형으로 변조된 주파수의 국부화에 대하여 에러가 최소인 불편 추정량으로 알려져 있다 [2].

$$W_X(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t+\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

일반적으로 Wigner-Ville 분포의 앙상블 평균을 통해 비정상 랜덤 진동의 시변 파워 스펙트럼 밀도를 추정할 수 있으며, 이를 Wigner-Ville 스펙트럼이라고 부른다. 하지만 앙상블 평균은 매우 많은 수의 신호가 필요하기 때문에 계산을 하기가 사실상 불가능하다. 따라서 대안으로 평활화 커널 함수로 정의된 창 안에서 신호가 지역적으로 정상이라고 가정하면, 한 개의 신호에 대한 시간 평균을 통해 Wigner-Ville 스펙트럼을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Wigner-Ville 스펙트럼의 한 종류로서, 식 (3)과 같이 시간과 주파수 영역에

† 교신저자; 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : bdyoun@snu.ac.kr

Tel : +82-2-880-1919, Fax : +82-2-880-8302

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

각각 개별적인 창 함수를 적용할 수 있는 평활화 의사 Wigner-Ville 분포를 이용해 가속도 신호의 시변 파워 스펙트럼 밀도(그림 2)를 추정하였다.

$$S_x(\omega, t) = \iint W_x(u, v)g(t-u)h(\omega-v)dudv \quad (3)$$

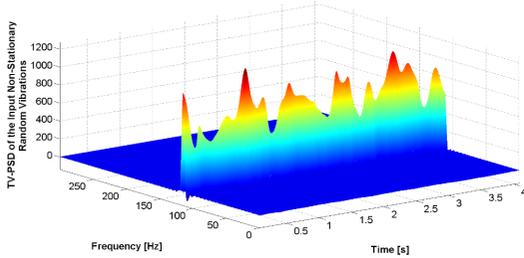


Fig. 2 Time-varying power spectral density of the input non-stationary random acceleration signal

3. 선형 연산자로서의 전기-기계 연성 모델

본 연구에서는 A. Erturk이 2009년에 유도한 외팔 보 압전 에너지 수확 장치의 전기-기계 연성 모델을 선형 연산자 $H(\omega)$ 로 채택하였으며, 주파수 ω 에 대한 전압 응답은 식 (4)와 같다 [3].

$$H(\omega) = \frac{j\omega R_f \theta_n}{(1 + i\omega R_f C_p / 2)(\omega_n^2 - \omega^2 + i2\zeta_n \omega_n \omega) + j\omega R_f \theta_n^2} \quad (4)$$

이 때, R_f 은 외부 저항, ω_n 과 ζ_n 은 각각 압전 에너지 수확 장치의 고유진동수와 감쇠 계수, θ_n 은 전기-기계 결합 계수, C_p 는 축전 용량이다.

4. 전압 응답의 시변 파워 스펙트럼 밀도 추정 및 평균 전력 예측

4.1 전압 응답의 시변 파워 스펙트럼 밀도

전압 응답의 시변 파워 스펙트럼 밀도는 식 (5)와 같이 정의된 선형 관계로부터 계산되며 [4], 결과는 그림 3과 같다.

$$S_v(\omega, t) = |H(\omega)|^2 S_x(\omega, t) \quad (5)$$

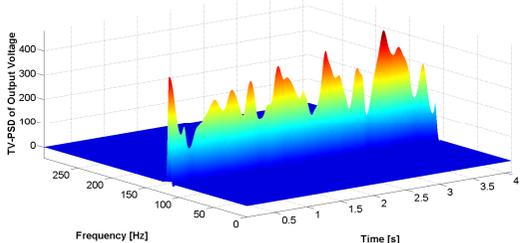


Fig. 3 Time-varying power spectral density of the output voltage response

4.2 평균 전력 예측

추정된 전압 응답의 시변 파워 스펙트럼 밀도를 역 푸리에 변환하면 전압의 자기상관 함수를 얻을 수 있으며, 이를 외부 저항으로 나누면 최종적으로 식 (6)과 같이 평균 전력을 계산할 수 있다.

$$E[P(t)] = \frac{E[v(t)^2]}{R_{load}} = \frac{1}{R_{load}} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_v(\omega, t) e^{i\omega t} d\omega \right) \quad (6)$$

그림 4는 계산된 평균 전력 결과를 나타내며, 약 3.33초에서 진폭이 6.35 m/s², 주파수가 115.9 Hz일 때 1650 μW를 수확할 수 있음을 알 수 있다.

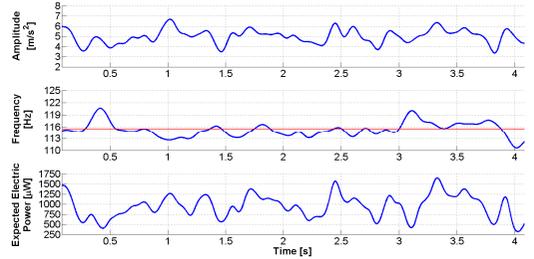


Fig. 4 Quantification result of the expected electric power

5. 결 론

본 연구는 비정상 랜덤 진동 하에서 수확 가능한 평균 전력 정량화를 위해 총 3단계의 수학적 해석 방법론을 제시하였으며, 시간-주파수 분석 기법을 압전 에너지 하베스팅 해석에 최초로 접목하였다. 제시된 방법론은 향후 무선 센서 네트워크 구축 타당성 검토를 위한 수확 가능 에너지 스캐닝 기술에 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기반형 융합기술개발 사업(과제번호: 0420-20120048)의 지원을 받은 것으로, 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) M. Feldman, 2011, Hilbert transform applications in mechanical vibration, John Wiley & Sons.
- (2) B. Boashash, 2003, Time Frequency Signal Analysis and Processing, ELSEVIER.
- (3) A. Erturk and D. Inman, 2011, Piezoelectric energy harvesting, John Wiley & Sons.