

교량진동을 이용한 진동형 자가발전기에 대한 연구

최남섭*

*여수대학교

A Study on Stand-Alone Electric Power Generator Using Bridge Vibration

Nam-sup Choi*

*Yosu National University

E-mail : nschoi@yosu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 교량의 건전도 감시용 계측 유닛에 사용되는 충전시스템을 위한 교량의 상시진동을 이용한 자립형 진동발전기에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 전기자 반작용의 영향을 최소화한 진동발전기를 제안하고, 기계적 및 전기적인 설계식을 유도한 다음, 시험용 진동발전기를 제작하였다. 아울러, 실내 자유진동 실험을 수행하였고, 충전시스템에 대한 실험 결과, 정류기에 사용된 다이오드 특성이 충전과정에서 지배적임을 확인하였다. 또한, 남해대교의 진동 데이터를 Pilot 발전기에 적용하여 시뮬레이션 한 결과 진동발전기의 적용성과 효율성을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper presents stand-alone electric power generator using bridge vibration for charging system of health monitoring sensor unit of bridge structure. In this paper, a novel electric power generator utilizing vertical vibration is proposed, which has minimum effect of armature reaction, and the related mechanical and electrical design equations are obtained and then a pilot electric power generator has been implemented. Moreover, the free oscillation test reveals that diode characteristics of rectifier is dominant factor in charging process. Also, simulation results with the Namhae bridge data showed the validity and effectiveness for stand-alone electric power generation.

키워드

진동발전기, 충전시스템, 구조물건전도감시, 자립형 계측유닛

1. 서 론

장대교량과 같은 구조물의 지속적인 관리를 위해서는 계측지점에 주기적인 접근이 쉽지 않으므로 대부분 원격기능을 갖춘 건전도 감시 시스템이 바람직하다. 모니터링 시스템은 센서(sensor), 통신장비, 자료저장시설, 자료분석시스템으로 구성되어있다. 그 가운데 센서와 통신장비는 교량에 산재하여 직접 설치되는데, 지속적인 운영을 위하여 이들 장치에 항상 전원이 공급되어야 한다⁽¹⁾.

이 전원 공급은 직접적인 배선 또는 배터리에 의하여 이루어지는데, 이들은 방대한 배선시설을 필요로 하고 또한 외부 악조건 하에 노출되어 있으므로 지속적인 유지 보수가 필요하다. 이 외에도 계측관심 위치이지만 구조물의 공간적 제약으로 배선상의 어려움이나 접근성의 확보가 어려워 전원을 공급하지 못하여 계측기를 설치하지 못하

는 경우도 있다. 이러한 전원공급장치의 경제적, 공간적 제약은 실제 교량의 모니터링 시스템 구축시 계측점의 수를 늘리지 못하는 주요원인으로 지적되고 있다. 따라서, 교량의 모니터링시스템 시설비용과 유지관리비를 대폭 줄이기 위하여 자립형 전력공급시스템이 요구된다.

일반적으로 무동력 자가발전시스템은 풍력이나 태양열을 이용한 방법도 있으나, 교량에서 풍력발전의 경우 설치 위치에 제한을 받고 풍향이나 풍량에 따라 발전량의 변동성이 매우 크며, 태양열발전 또한 태양 지향성에 의해 교각 하부에 설치할 수 없는 등 설치 위치에 제한을 받고, 외부환경의 먼지나 이물질에 의해 솔라셀(solar cell)이 오염시 발전 효율이 급격히 저하되고 역시 일기의 변화에 민감하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전력자급형 계측시스템이 가능하도록 교량에서 상시적으로 발생하는 상하미소진동을 이용한 무인 무동력 자가 발전시스템을 제안한다. 제안된 진동발전기는 교량의 임의의 위치에 독립적으로 설치할 수 있고 외부적 환경인 일기의 변화에 거의 무관하게 항상 일정한 발전량을 가지며, 또한 구조적으로 밀폐형으로 제작할 수 있어서 외부의 충격이나 간섭에서 보호될 수 있고, 반영구적인 수명을 갖는다는 장점이 있다.

본 연구에서는 자속의 방향과 권선 및 권선의 진행방향이 항상 수직인 배치를 갖는 새로운 구조의 상하진동형 영구자석 발전기를 제안한다. 또한, 발전된 교류전력을 직류전력으로 변환하는 정류기를 포함한 진동발전시스템을 설계하고 관련된 수식을 유도하며 고려해야 할 점들을 논하고, 실제 Pilot 진동발전기를 설계 및 제작, 테스트 실험을 수행하며 그 결과를 남해대교 실측 데이터로부터 얻어진 시뮬레이션 결과와 비교함으로써, 제안된 진동발전시스템이 실제 교량의 전력자급형 계측유닛의 독립전원으로 사용될 수 있다는 타당성을 보인다.

II. 진동발전기의 기계적 특성

그림 1은 진동발전기의 기본적 구성의 개념도이며 스프링 상수 k 인 스프링과 질량 m 인 질량체, 감쇠계수 c 인 댐퍼로 이루어진 간단한 기계적 진동모델을 나타낸다. 그림 1(b)에서 베이스 플레이트의 변위를 u , 코일이 감겨져 있는 질량체의 변위를 x 라 하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$-k(x-u) - c\left(\frac{dx}{dt} - \frac{du}{dt}\right) = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

교량 구조물 바닥의 변위 u 가

$$u(t) = U \sin(\omega t) \quad (2)$$

와 같이 조화운동을 한다고 가정하고, x 와 u 의 상대 변위 z 를 $z = x - u$ 정의하면 식 (1)은

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = -m \frac{d^2u}{dt^2} \quad (3)$$

이 된다.

정상상태에서 상대운동 z 는 바닥면의 운동을 따르며 다음과 같다.

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

따라서, 진폭비 Z/U 와 위상차 ϕ 에 대하여 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{Z}{U} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (6)$$

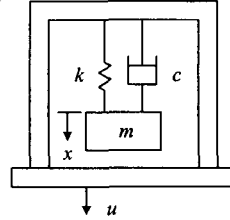


그림 1. 진동발전기의 역학적 모델
Fig. 1 Mechanical model of vibration powered generator .

여기서, ω_n 과 ζ 는 각각 고유진동수와 감쇠비이며 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (7)$$

$$\zeta = c/(2m\omega_n) \quad (8)$$

한편, 시스템의 특성을 나타내는 자유진동은 $u(t)=0$ 이고, 초기 변위 $x(0) = x_{init}$ 에 대한 시스템의 자연응답을 나타내며 식 (1)로부터,

$$x(t) = \frac{x_{init}}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \theta) \quad (9)$$

이다. 여기서,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (10)$$

III. 진동발전기의 전자기적 설계

자계 B wb/m²에 놓여진 길이 L_{coil} 의 도체를 $\dot{z}(t)$ m/sec의 속도로 자계와 직각으로 움직일 때 도체에 유기되는 기전력 $e(t)$ 는 패러데이의 법칙에 의해

$$e(t) = B L_{coil} \frac{d}{dt} z(t) \quad [V] \quad (11)$$

이며, 방향은 플레밍의 오른손법칙을 따른다.

그림 2는 진동발전기의 Nd-Fe-B 영구자석 주위의 자계시스템과 코일의 배치를 나타낸다. 그림 2에서 (a)는 진동발전기의 상단에서, (b)는 정면에서 영구자석과 코일의 배치를 본 모양으로, a-b-c-d는 가동코일권선이며 코일권선을 향하여 두 개의 N극이 마주보도록 사각형 영구자석이 배열된다. 여기서 자속과 쇄교하는 코일의 유효길이 L_{coil} 은 자속의 방향 ϕ_m 과 직각인 권선의 총길이, 즉,

$$L_{coil} \approx (\text{권선수}) \times (\overline{ab} \text{ 길이} + \overline{cd} \text{ 길이}) \quad (12)$$

로 볼 수 있다. \overline{bc} 와 \overline{da} 부분은 자속과 직각의 방향을 이루지 않으므로 기전력의 생성에 기여하지 못하는 권선성분이다.

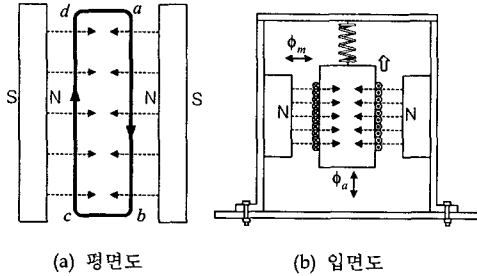


그림 2. 진동발전기의 자기시스템과 코일의 배치
Fig. 2 Magnetic system and coil arrangement of vibration powered electric generator.

그림 7(b)에는 상하운동을 하는 전기자가 상방향으로 움직일 때 코일에 유기되는 유도전류의 방향을 도시되어 있는데, ⊙는 전류가 지면쪽을 향하여 흐르고, ⊙는 반대로 지면으로부터 나오고 있는 방향을 의미한다. 일반적으로 직류 및 교류의 회전기 발전기에는 기전력에 의하여 전기자 권선에 전류가 흐르면 기자력이 발생되고 이 기자력이 계자의 기자력에 작용하여 자속의 분포를 변화시키는 전기자 반작용 현상이 존재한다. 이러한 전기자 반작용은 고정자 자속을 감소시켜 자기적 중성점을 이동시킴으로써 발전기의 출력을 저하시키게 된다. 그러나, 그림 7의 영구자석과 코일의 기하학적 배치는 영구자석의 자속 ϕ_m 의 방향과 가동코일권선에 유기된 전류에 의하여 발생하는 기자력 ϕ_a 의 방향이 서로 항상 수직이므로 상호 감작작용이 발생하지 않는 구조이다. 즉, 제안된 진동발전기는 가동 코일에 의한 자속과 고정자 자속이 항상 직각으로 쇄교하므로, 고정자 자속을 거의 100% 활용 가능한 구조이다⁽²⁾.

그림 3은 진동발전기의 전기적 등가회로와 다이오드 정류회로도 보인다. 그림 3에서 C_s 는 코일의 인덕턴스 L 과 정류 다이오드의 접합 커패시턴스 때문에 발생하는 기생 공진을 막기 위한 필터역할을 하는 커패시터이며, 발전기와 정류기의 기본적인 동작에 영향을 미치지 않으므로 회로의 동작을 고려할 때 무시할 만하다.

IV. 특성 실험 및 시뮬레이션

그림 4는 진동발전기의 역학적 특성과 전자적 설계기준을 고려하여 제작된 Pilot 진동발전기를 나타낸다. 표 1은 Pilot 발전기 및 정류회로의 전자적 요소의 값들을 나타낸다.

발전기 진자의 역학적 특성은 간단한 정적시험과 그림 5와 그림 6에 보인 자유진동시험을 통하여 표 2와 같이 측정하였다. 즉, 시험용 발전기의 고유진동수는 약 1.0 Hz이고 감쇠비가 0.14%로서 장주기이고 감쇠가 매우 작은 시스템이다. 시스템

의 감쇠는 기계적 손실과 전기적 손실로부터 발생하는데, 제안된 진동발전기는 전기자 반작용이 거의 영향을 미치지 않으므로 전기적 손실이 최소화됨을 알 수 있다.

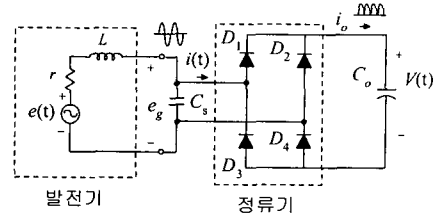


그림 3. 진동발전기 등가회로와 다이오드 정류 회로
Fig. 3 Equivalent circuit of vibration powered electric generator with diode rectifier.

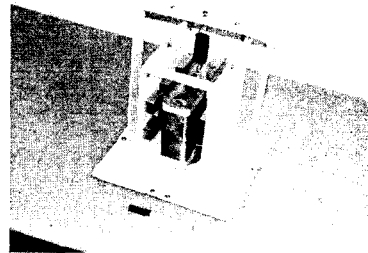


그림 4. 실내시험을 위한 Pilot 진동발전기
Fig. 4 Pilot generator for indoor test

표 1. Pilot 발전기의 전자기적 파라미터
Table. 1 Electromagnetic parameter of pilot generator

파라미터	값
유효자속밀도, B	0.034 Tesla
코일의 유효길이, L_{coil}	92.40 m
코일의 인덕턴스, L	8.2 mH
정류기 커패시턴스, C_o	470 uF
코일의 권선저항, r	40 Ω
필터 커패시턴스, C_s	0.01 uF
다이오드	1N4148

표 2. 역학적 특성 파라미터
Table. 2 Mechanical parameters

파라미터	값
질량, m	0.67 kg
스프링 상수, k	31.04 N/m
고유진동수, f_n	1.08 Hz
감쇠비, ζ	0.14 %

그림 6은 자유진동시 커패시터에 축전되는 전압의 실험파형을 보인다. 그림 6에서 자유진동 초

기에 충전전압은 급격히 상승하고, 이후 일정한 기울기를 갖고 점차 증가하는 파형을 나타낸다. 이것은 다이오드의 특성에 따라 충전특성이 지배됨을 보여주는 결과이다. 즉, 그림 5에서 보듯이, 자유진동의 초기에 발전하는 전압의 크기가 1 V에 이르고, 이 경우 다이오드는 약 0.7 V의 threshold 전압보다 큰 전압이 인가되므로 완전도통하는 상태가 되며, 다이오드 등가저항은 매우 작은 값이 된다. 그러나, 자유진동에 의한 발전전압이 0.7 V 보다 작아지면, 다이오드 전류는 급속히 감소하고, 등가저항은 전류에 반비례하여 증가한다. 그 결과, 발전전압 0.7 V는 그림 7의 파형에서 변곡점이 된다.

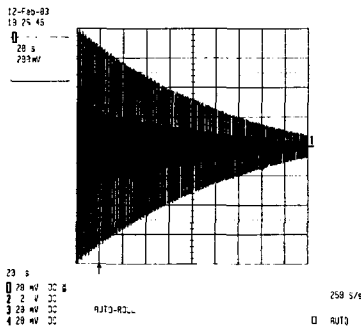


그림 5. 자유진동시의 출력전압(0.2V/div, 20 sec/div)
Fig. 5 Generator output voltage under free oscillation(0.2V/div, 20sec/div)

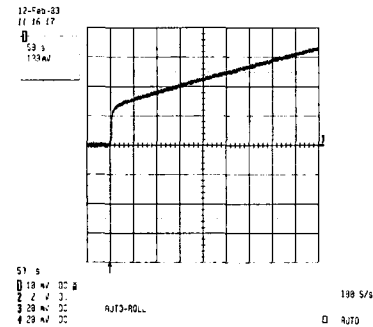


그림 6. 자유진동시의 커패시터 전압(0.1 V/div, 50 sec/div)
Fig. 5 Capacitor voltage under free oscillation (0.1 V/div, 50 sec/div)

본 연구에서는 남해대교에서 계측된 구조물의 진동을 입력으로 제작된 Pilot 진동발전기의 발전 성능을 시뮬레이션하여 제안된 진동발전기의 실현가능성을 검토하였다. 그림 7은 중앙경간 보강형의 수직진동을 이용한 결과이다. 이들 진동기록은 1999년 11월 24일 계측된 것으로서 당시 남해대교의 유지관리를 담당했던 현대건설에 의해 계측되었다⁽³⁾. 중앙경간 중앙의 수직진동에 의한 발

전기의 성능은 그림 14에서 알 수 있듯이 20초 동안 52.86V로 충전되어 평균 32.85mW의 발전 성능을 나타낸다. 이는 약 118Wh의 용량의 발전기에 해당하므로 충분한 실용성을 갖는다.

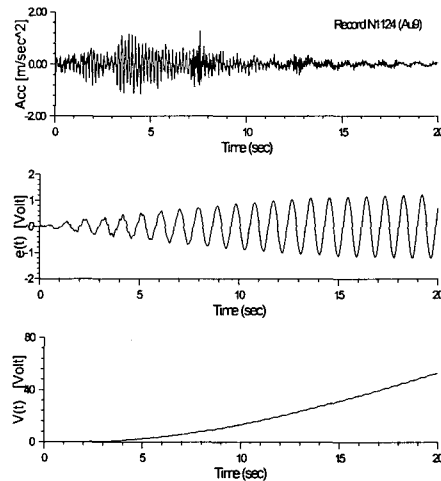


그림 7. 남해대교 수직진동 입력에 의한 Pilot 발전기의 성능
Fig. 7 Performance of pilot generator when applying vertical vibration data of the Namhae bridge

V. 결 론

본 연구에서는 교량의 상시적 상하진동을 이용한 전기에너지의 발생을 위하여 기본적인 진동발전기의 구조를 제안하였다. 또한, 진동발전기의 기계적 및 전기적 특성식을 유도하였으며 시험용 발전기를 설계 제작하였다. Pilot 발전기에 대한 자유진동실험으로부터 다이오드의 효과를 확인하였고, 남해대교에서 계측된 가속도 데이터를 발전기에 입력 시뮬레이션하여 Pilot 발전기의 가능성과 효율성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Kiremidjian, A.S., et al, "Structural damage monitoring for civil structures", Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 1997, pp. 371-382.
- [2] 최호용, 정상용, 정현교, 최양승, 김규만, "휴대용 기기 충전용 선형 발전기 특성 해석", 2000년도 대한전기학회 추계부문 학술대회 논문집, 2000, pp. 297-299.
- [3] 현대건설 기술연구소, 남해대교 계측보고서, 1997, 296쪽.