

# 산업전기 설비의 상태 감시를 위한 자가 발전 센서 시스템의 설계

## Design of Self-Powered Sensor System for Condition Monitoring of Industrial Electric Facilities

이 기 창\*, 강 동 식\*, 진 정 우\*, 황 돈 하\*, 이 주 훈\*, 홍 정 표\*\*

(Ki-Chang, Dong-Sik Kang, Jeong-Woo Jeon, Don-Ha Hwang, Ju-Hun Lee, Jeong-Pyo Hong)

**Abstract** - Recently, on-line diagnosis methods through wired and wireless networks are widely adopted in the diagnosis of industrial Electric Facilities, such as generators, transformers and motors. Also smart sensors which includes sensors, signal conditioning circuits and micro-controller in one board are widely studied in the field of condition monitoring. This paper suggests a self-powered system suitable for condition-monitoring smart sensors, which uses parasitic vibrations of the facilities as energy source. First, vibration-driven noise patterns of the electric facilities are presented. And then, an electromagnetic generator which uses mechanical mass-spring vibration resonance are suggested and designed. Finally energy consumption of the presented smart sensor, which consists of MEMS vibration sensors, signal conditioning circuits, a low-power consumption micro-controller, and a ZIGBEE wireless transceiver, are presented. The usefulness and limits of the presented electromagnetic generators in the field of electric facility monitoring are also suggested.

**Key Words** : Wireless Sensor Network: Smart Sensor: Self-Powered Sensor

### 1. 서 론

최근 설비 진단 분야에서는 센서 및 진단 시스템의 On-Line화와 더불어 분산 센서, 유비쿼터스 컴퓨팅 등의 기술도 많이 접목되고 있는 추세이다. 본 논문에서는 발전기, 변압기, 전동기 등의 산업 전기 설비의 진동을 감시하기 위한 센서 시스템으로 그림 1과 같은 자가발전 스마트 센서 시스템을 제안한다. 최근의 마이크로프로세서의 고기능화 및 저전력화, ZIGBEE 등의 저전력 무선통신 기술 및 MEMS 기술을 접목한 경제적인 진동센서의 개발로, 수십 mW의 상시 전력만 확보되면, 배터리 등의 전원이 필요 없는 무선센서의 개발이 가능하게 되어, 산업 현장에 내재하고 있는 온도차, 열, 자속, 진동 등의 미소에너지를 이용한 전원개발이 중요한 이슈가 되었다.[1][2][3]

그림 2에 전력용 변압기의 표면에 부착된 진동측정 센서로부터 측정된 진동 데이터의 예를 보인다. 60 (Hz)의 전원에서 동작중인 전력용 변압기는 그 구조상 120 (Hz) 및 그 고조파로 구성되는 진동신호 패턴을 가짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 변압기 진동패턴을 이용한 자가 발전기에 대하여 연구하였다. 먼저 120 (Hz)에 알맞은 질량-스프링 공진회로를 설계하여, 진동신호로부터 얻을 수 있는 최대 변위를 구하고, 보이스 코일 형태의 전기자기적 발전기의 상세 스펙을 제안하였다. 이러한 진동을 이용한 자가 발전 시스템은 특정 주파수 스펙트럼을 가지는 진동 노이즈가 존재하는 산

업현장에서 그 설비의 진동을 분석하고 진단하는 무선 스마트센서의 개발에 응용될 수 있다.

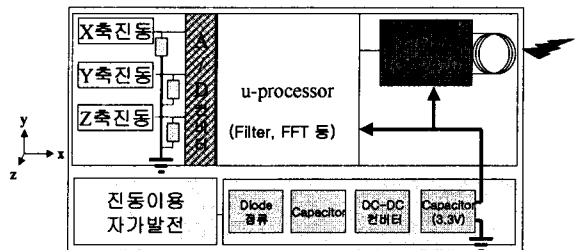


그림 1 진동 측정용 자가발전 스마트센서 시스템의 구성도  
Fig. 1 Self-powered smart sensor system for vibration monitoring

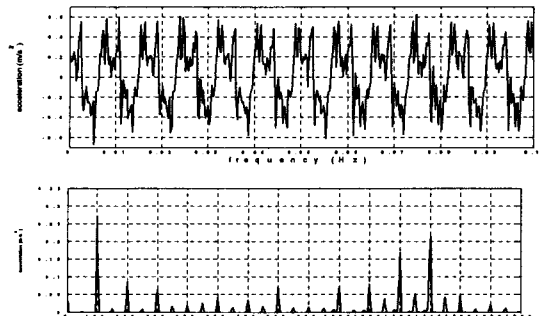


그림 2 전력용 변압기 진동 측정 결과  
Fig. 2 Vibration monitoring of a power-transformer

저자 소개

\*한국전기연구원 산업전기연구단

\*\*창원대학교 전기공학과

## 2. 자가 발전 전원장치의 설계

산업현장에 내재하는 진동신호로부터 스마트 센서에 필요한 전원을 발생시키기 위하여, 변압기 몸체에 부착되어, 균일한 자기장속에서 진동하는 무게  $m$ 인 보이스코일 형태의 자가발전 시스템을 고려하였다.

### 2.1. 기계적 공진회로의 설계

#### 2.1.1 기저진동 시스템

보이스코일 형태의 자가발전 시스템은 그림 3처럼 지지대의 운동에 의해 가진이 되는 질량  $m$ 으로 모델링 할 수 있다.

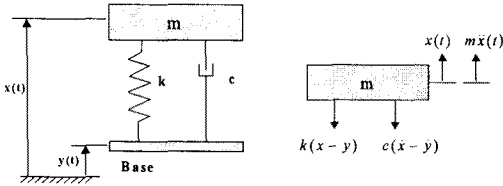


그림 3 기저 진동에 의한 질량  $m$ 의 강제 진동 모델링  
Fig. 3 Forced-vibration model of mass  $m$  by base-vibration

질량  $m$ 에 관계된 힘들을 합하면, (즉, 관성력  $m\ddot{x}$ 는  $m$ 에 작용하는 스프링력과 댐핑력의 합과 같고, 중력은 스프링의 정적변위로 평형을 유지한다) 다음 식을 얻는다.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} + \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (1)$$

기저 진동 문제에 있어서 기저(Base)는 조화함수처럼 움직이는 것으로 가정한다. 즉

$$y(t) = Y \sin(\omega_b t) \quad (2)$$

여기서  $Y$ 는 기저 운동의 진폭을 나타내며,  $\omega_b$ 는 기저 진동의 진동수를 나타낸다. (2)의  $y(t)$ 를 강제진동 운동방정식에 대입하고 정리하면,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY\omega_b \cos(\omega_b t) + kY \sin(\omega_b t) \quad (3)$$

(3)은 두 개의 조화 입력이 있는 스프링-질량-감쇠기 시스템으로 생각할 수 있으며, 우변의 두 항은 각각 강제 조화 응답과 자유 조화 응답을 나타낸다. (4)를 가정하면, (3)은 (5)와 같이 고쳐질 수 있다.

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (4)$$

$$\ddot{x} + 2\xi w \dot{x} + w^2 x = 2\xi w \omega_b Y \cos(\omega_b t) + w^2 Y \sin(\omega_b t) \quad (5)$$

선형시스템에 대한 중첩의 원리를 이용하여 (5)에 대한 특수해를 구하면

$$x_p(t) = wY \left[ \frac{w^2 + (2\xi\omega_b)^2}{(w^2 - \omega_b^2)^2 + (2\xi w \omega_b)^2} \right]^{1/2} \cos(\omega_b t - \phi_1 - \phi_2)$$

$$\text{단, } \phi_1 = \tan^{-1} \frac{2\xi w \omega_b}{w^2 - \omega_b^2}, \quad \phi_2 = \tan^{-1} \frac{w}{2\xi w_b} \quad (6)$$

특수해  $x_p(t)$ 의 크기를  $X$ 라고 하면  $X$ 는 다음과 같이 표

현된다.

$$\frac{X}{Y} = \left[ \frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2} \right]^{1/2}, \quad \text{단 } r = \frac{\omega_b}{w} \quad (7)$$

(7)은 기저 진동에 의한 최대 변위 입력에 대한 질량  $m$ 의 최대 변위 출력 크기의 비를 나타내며, 이 비를 변위 전달률 (Displacement transmissibility)이라 부른다. 이것은 기저로부터의 운동이 질량으로 얼마나 전달되었는가를 진동수비 ( $r = \frac{\omega_b}{w}$ )의 함수로 나타내며, 그림 4에 도시하였다.

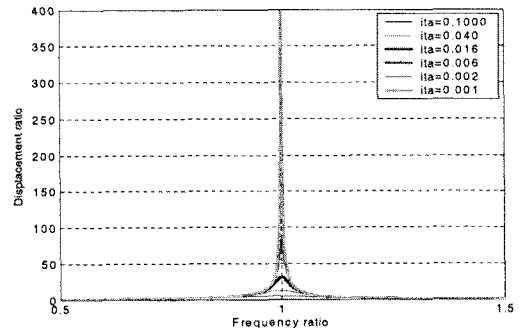


그림 4 진동수비에 따른 변위 전달률 그래프  
Fig. 4 Displacement transmissibility w.r.t frequency ratio

그림에서  $r < \sqrt{2}$ 일 때에는 전달률이 1보다 커지며, 이러한 시스템 변수( $w$ )와 기저진동수( $\omega_b$ )의 값에 의해서 질량의 운동이 기저의 운동보다 커진다. 또한 주어진  $r$ 값에 대해서 감쇠비  $\zeta$ 가 작을수록 전달률이 커진다.[4]

#### 2.1.2 변위 전달율을 이용한 기계적 공진 파라미터 결정

이러한 조건에서 최대 기계적 출력을 얻기 위해서, 질량-스프링으로 제작될 공진 진동수가 기저 진동 주파수의 98% 이내라고 가정하였다. 설계하는 용수철의 감쇠계수(Damping Coefficient,  $c$ )는 0.01 이하로 가정하였다. 이 값은 실제 제작될 용수철 및 공기 마찰에 의한 감쇠를 고려할 때 충분히 큰 값이다. 그림 2의 전력용 변압기 진동측정 데이터로부터, 기저 진동은 최대진폭 0.6 ( $\mu\text{m}$ )를 가지는 120 (Hz) 기본파와 그 고조파로 구성된다. 만약 120 Hz에서 공진하도록 스프링-질량을 선정한다고 가정하면 진동수비  $r$ 은 1이 되고,  $\zeta = \frac{c}{2mw}$ 를 식 (7)에 대입하면,

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{1 + \left(\frac{w}{c}\right)^2 m^2} \quad (8)$$

따라서 공진 시 변위 전달율은 질량의 증가에 비례함을 알 수 있다. 만약 진동수 비가 1에 가까워서 설계된 스프링과 질량이 120 (Hz)에서 완전히 공진을 이루면, 0.6 ( $\mu\text{m}$ )의 기저 진폭에 대해서, 질량의 변위는 약 5 (mm)가 된다. 이러한 질량-스프링 파라미터 중 최종적으로 질량  $m=10$  (g), 스프링 상수  $k=5684$ 로 선정하였다.

## 2.2. 자기회로 및 전기회로 파라미터 결정

보이스코일형 자가 발전기에서 발생하는 요구 단자전압을 2[V], 부하의 역률을 0.8로 고려했을 때, 부하 임피던스를 24 ( $\Omega$ )의 순수 저항부하로 가정하였다.

공진 시 시저가 (2)식처럼 움직이면, 질량  $m$ 인 보이스코일의 속력은 변위의 변화량 이므로,

$$V = (2\pi f)X = (2\pi f)Y\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2}m^2 \quad (9)$$

따라서, 균일한 자속 밀도  $B$ 속에서, 속도  $V$ 로 움직이는 도체의 길이  $L$ 인 보이스코일에서 발생하는 유기기전력  $e$ 는  $e = BLV$ 이므로 필요한 보이스코일의 전체 길이는

$$L = \frac{e}{(2\pi f)BY\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2}m^2} \quad (10)$$

필요한 보이스코일의 길이는 변위 및 질량에 반비례 한다.

### 2.2.1 보이스코일의 사양 및 전기적 상수 산정

가정한 역률에서 요구되는 출력과, 단자전압을 얻기 위한 전류를 산정하면,  $I = \frac{P_{out}}{V \times \cos\phi} = 0.103124[A]$ 이다.

보이스코일의 전체 길이와 전류밀도 범위에 의해 코일의 단면적 및 직경을 산정하고, 저항을 결정 한 후, 전류밀도 범위에 따른 저항을 산정 후 부하 저항을 고려한 전체 저항을 산정하여, FEM으로 턴 수를 변화시키면서, 보이스코일의 턴 수 변화에 따른 인덕턴스를 산정하고, 부하저항을 포함한 전체 저항 및 인덕턴스를 이용하여 부하측 전류를 재 산정하여, 이 값으로 부하단 전압을 재 산정 후, 재 산정된 단자전압과 전류를 이용하여 전기적 출력을 계산하였다.

이상의 결과를 바탕으로 보이스코일은 0.35(mm) 직경을 가지는 22 turn으로 하였다. 이 때 보이스코일의 중량은 1.1 (g)이 되었으며, 지지대 중량 및 스프링의 중량을 8.9로 하여 전체 유효 질량은 10(g)이 되게 설계하였다. 그림 5에 결정된 Dimension을 나타내었다.

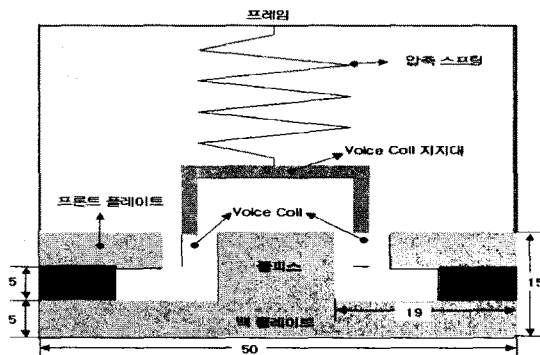


그림 5 Voice Coil형 전력변환 장치의 설계  
Fig. 5 Electromechanical transformer using a voice coil

이상의 설계 자료를 사용하였을 때, 공진 시 보이스코일의 변위 변화에 따른 유기기전력  $e$ 의 변화를 그림 6에 나타내었다.

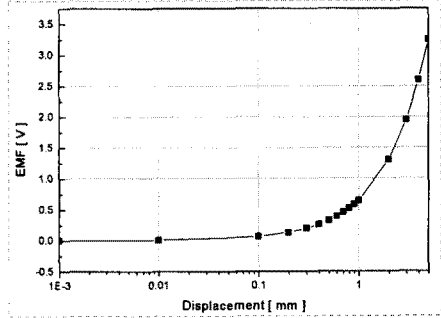


그림 6 보이스코일의 변위변화에 따른 단자 유기전압 변화  
Fig. 6 Terminal voltage variations w.r.t voice coil displacement

## 3. 결론

유·무선 네트워크를 통한 On-Line 진단 방법은 오늘날의 발전기, 변압기, 모터 등의 산업전기 설비 진단에 광범위하게 채택되고 있다. 또한 센서와, 신호 컨디셔닝 회로, 마이컴 등을 한 보드에 내장한 타입의 스마트 센서들이 상태 감시 영역에서 광범위하게 응용되고 있는 추세이다.

이 논문에서는 산업전기 설비의 운전 시 내재하는 진동 노이즈를 에너지원으로 사용하여, 산업전기 설비의 상태 감시를 목적으로 하는 스마트 센서 등에 적용 가능한 자가발전 시스템을 제안하였다.

먼저, 산업 전기 설비의 진동 노이즈 패턴을 제시하고, 이러한 노이즈 진동 에너지로부터 전력을 얻기 위하여 특정 주파수에서 기계적인 질량과 용수철의 공진을 이용한 전기·자기적 발전기의 제작 가능성을 보였다. 또한, MEMS(Micro Electro Mechanical System) 진동 센서와, 신호 컨디셔닝 회로 및 저전력 마이컴과 ZIGBEE 무선 트랜시버로 구성되는 스마트 센서의 에너지 소비를 계산하였다. 이렇게 계산된 에너지를 바탕으로, 필요한 기계 공진형 발전기의 스펙을 결정하였다.

## 참고 문헌

- [1] Glynn-Jones P., et al, "An electromagnetic vibration-powered generator for intelligent sensor systems", Sensors and Actuators, A:Physical, 110, pp. 344-349. 2004
- [2] Mitcheson, P.D., Green, T.C., Yeatman, E.M., Holmes, A.S., "Architectures for vibration-driven micropower generators", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol 13, no. 3, pp. 429-440, June 2004.
- [3] James E.P., et al, "An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications", Sensors and Actuators, A:Physical, 110, pp. 171-176, 2004.
- [4] Inman, Daniel J, 이진복 외 역, "최신 기계 진동학 (Engineering Vibration)", 피어슨에듀케이션코리아, 2004.