

진동에너지 하베스팅을 이용한 전력감지시스템용 리니어 전자기 발전기에 관한 최적설계

조성진*, 김진호*.[#]

*영남대학교 기계공학과

A Study on Optimal Design for Linear Electromagnetic Generator of Electricity Sensor System using Vibration Energy Harvesting

Seong Jin Cho*, Jin Ho Kim*.[#]

*School of Mechanical Engineering, YEUNGNAM UNIV.

(Received 8 December 2016 received in revised form 3 January 2017; accepted 23 January 2017)

ABSTRACT

Recently, an electricity sensor system has been installed and operated to prevent failures and accidents by identifying whether a transformer is normal in advance of failure. This electricity sensor system is able to both measure and monitor the transformer's power and voltage remotely and send information to a manager when unusual operation is discovered. However, a battery is required to operate power detection devices, and battery systems need ongoing management such as regular replacement. In addition, at a maintenance cost, occasional human resources and worker safety problems arise. Accordingly, we apply a linear electromagnetic generator using vibration energy from a transformer for an electric sensor system's drive in this research and we conduct optimal design to maximize the linear electromagnetic generator's power. We consider design variables using the provided design method from Process Integration, Automation, and Optimization (PIAnO), which is common tool from process integration and design optimization (PIDO). In addition, we analyze the experiment point from the design of the experiments using "MAXWELL," which is a common electromagnet analysis program. We then create an approximate model and conduct accuracy verification. Finally, we determine the optimal model that generates the maximum power using the proven approximate kriging model and evolutionary optimization algorithm, which we then confirm via simulation.

Key Words : Energy Harvesting(에너지 하베스팅), Vibration(진동), Linear Electromagnetic Generator(리니어 전자기 발전기), Design of experiments(실험계획법), Size Optimization(사이즈 최적화)

1. 서 론

주변에서 쉽게 접할 수 있는 진동대 위에 달려 있는 주상 변압기의 경우 여름철 높은 온도로 인한 과부하나 겨울철 동파 등으로 인한 등변압기의 이상여부를 사전에 발견하여 고장사고 등을 예방하기 위해 전력감지시스템이 장착되어 운용되고 있다¹⁾.

Corresponding Author : jinho@ynu.ac.kr

Tel: +82-053-810-2441, Fax: +82-053-810-4627

이러한 전력감지시스템은 변압기의 전압 및 전력 등을 원격으로 측정하거나 감시하여 변압기의 이상 작동에 대한 관리자에게 그 정보를 전송하는 기능이 있다. 하지만 전력감지시스템을 작동시키기 위해서는 배터리가 필수적으로 필요하며, 이러한 배터리 시스템은 정기적으로 교체를 해야 하므로 지속적인 관리가 필요하다²⁾. 하지만 지속적인 교체로 인해 인적자원 및 비용이 소모되며 특히, 산악지역이나 사람이 쉽게 이동할 수 없거나 교체하기 어려운 경우 안전문제 등으로 인한 더욱 많은 유지보수 관리비용이 소모된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 에너지 하베스팅 기술을 적용하여 변압기에서 소산되는 진동에너지를 이용한다면 배터리를 교체하기 위한 유지보수비용 및 안전에 대한 문제를 해결할 수 있다. 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)이란 태양열, 진동, 압력 등의 에너지와 같이 우리 일상생활 주변에 산재하지만 버려지는 에너지들을 수확하여 이를 사용할 수 있는 전기 에너지로 변환하는 것을 말한다³⁾. 이러한 하베스팅 에너지원 중 진동에너지에 이용된 하베스팅은 밀도가 높으며 기구 환경에 영향을 받지 않고 사용되는 공간의 제약을 받지 않아 하베스팅 에너지원으로 많은 관심을 받고 있고 장치 안으로 내장이 가능하기 때문에 외부 환경의 영향을 받지 않아 삽입형 디바이스에 적용가능한 장점이 있다^{4,5)}. 또한 진동에너지 하베스팅 방식에는 정전기(Electrostatic), 전자기(Electromagnetic), 압전(Piezoelectric)을 이용하는 방식이 있다. 그 중 전자기 기반 방식을 이용한 방식은 높은 전력 효율을 발생하는 장점이 있어 발전기 시스템에 적용한다면 지속적인 전기에너지를 생산할 수 있다^{6,7)}. 전자기 기반 방식을 적용한 발전기에는 크게 리니어 발전기와 로터리형 발전기가 있다. 그 중 리니어 발전기의 경우 진동특성을 그대로 이용하기 때문에 기계적 변환장치가 필요하지 않을뿐더러 로터리형 발전기에 비해 구조가 단순하여 경량화 및 소형화가 가능해지며 유지 및 보수가 쉽다는 장점이 있다⁸⁾.

이를 통해, 본 연구에서는 주상 변압기에서 생성된 60Hz의 진동에너지를 하베스팅하여 전력감지시스템의 배터리 시스템 대신 작동시키기 위한 100mW 이상의 리니어 전자기 발전기를 연구하였

다. 또한, 리니어 전자기 발전기의 최대 발전량을 위해 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIAO(Process Integration, Automation and Optimization)에서 제공하는 설계기법들을 사용하여 설계변수 개수를 고려하였다. 실험계획법을 통해 도출된 실험 점에 대한 상용 전자기 해석 프로그램인 MAXWELL을 사용하여 해석을 수행하였으며, 실험계획 결과로부터 근사모형을 생성하고 정확도를 검증하였다. 검증된 근사모형인 크리깅(krigging) 모델과 최적화 진화 알고리즘을 이용하여 리니어 전자기 발전기의 발전량이 최대가 되는 최적 모델을 결정하고 전자기 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 리니어 전자기 발전기

2.1 원리 및 구조

Fig. 1는 리니어 전자기 발전기의 개략도이다. 리니어 전자기 발전기의 구조에는 영구자석, 코어, 스프링, 축으로 구성되어 선형적으로 움직이는 전기자(Armature)와 코일로 구성된 고정자(Stator), 전체

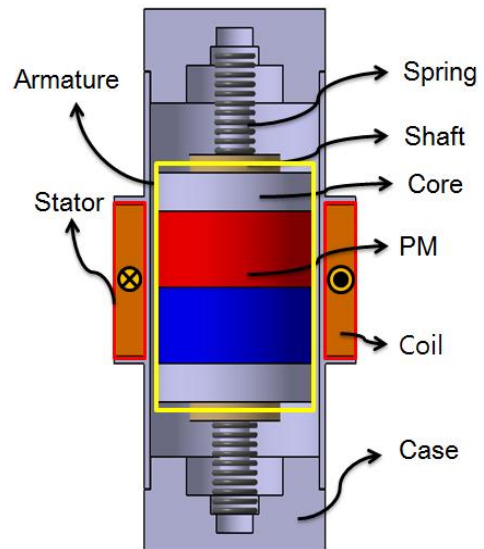


Fig. 1 The structure of proposed linear electromagnetic generator

케이스(Case)로 구성된다. 전기자의 구성품인 영구 자석은 자력이 높은 Nd-Fe(Neodymium-Ferrite)로 알려진 네오디뮴 자석을 사용하고 Shaft는 비 자성체 물질인 스테인리스강(Stainless Steel) 계열을 사용하였고 코어(Core)의 경우 자석에서 나오는 자기장의 전도체 역할을 수행하거나 누설되는 자기를 최소화하기 위한 역할을 하므로 순철이나 Steel_1010 계열의 재료를 사용한다.

변압기에서 생성되는 60Hz 를 제안된 리니어 전자기 발전기에 적용하게 되면 발전기의 전기자 부분이 축 방향으로 움직인다. 이 때, 진동을 통해 발전기 내부 전기자의 영구자석 위, 아래로 선형적인 운동을 할 때 이동자에 있는 코일들을 통과하게 되면 코일에 기전력(Electro-Motive Force, EMF)이 유기되어 전기에너지를 생성한다. 생성된 전기에너지인 EMF는 Faraday의 법칙에 의해 기전력은 다음과 같이 식 (1) 로 나타낼 수 있다.

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dz} \frac{dz}{dt} \quad (1)$$

이 때, N 은 코일 턴 수, Φ 는 시간 t 동안 각각의 턴에 통과하는 flux, $\frac{dz}{dt}$ 는 Armature의 z방향 변위에 대한 속도이다. 위 식에서 나타난 바와 같이 기전력은 Armature의 변위와 속도, 자속의 변화 그리고 코일 턴 수에 비례한다^[9].

3. 전자기 시뮬레이션 해석 및 분석

본 연구에서는 주상변압기의 진동에너지를 하베스팅하여 배터리가 필요한 전력감지시스템에 자가 발전하여 전력을 공급하는 리니어 전자기 발전기를 적용하고자 한다. 이를 위해 리니어 전자기 발전기의 발전량이 전력감지시스템의 구동 전력인 100mW를 충족하는지와 자가발전을 하는 리니어 전자기 발전기에 대한 적용 가능성을 알아보기 위해 전자기 시뮬레이션 해석 수행이 필요하다. 이를 수행하기 위해 초기 리니어 전자기 발전기 형상에 대한 치수를 설정하였다. 초기 리니어 전자기 발전

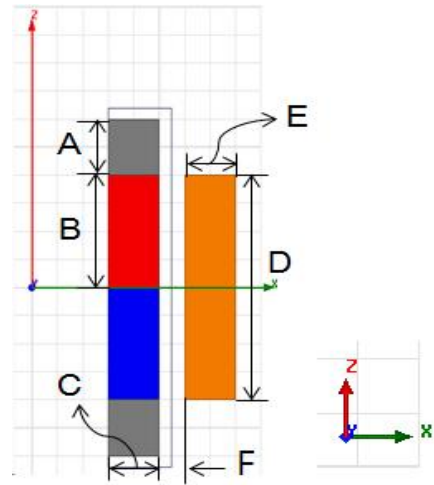


Fig. 2 Linear generator on axial-symmetric view

기 모델의 전체 Case길이는 130mm 이고 직경은 80mm인 형상을 가진다. 설정된 Case 내부 치수에 맞게 전기자의 전체 길이 및 직경을 설정하였고 이는 각각 60mm 와 50mm 으로 설계된다. 설정된 전기자의 크기에 맞추어 코어와 영구자석의 비율을 1:2로 설정하여 초기 리니어 전자기 발전기 모델을 선정하였다. 사용된 전기자의 구성품인 자석과 코어의 수는 2개, 자석과 코어의 두께는 10mm 이며 높이는 각각 20mm, 10mm 이다. Fig. 2은 선정된 초기 모델의 전자기적 특성을 분석하기 위해, 상용 전자기 유한요소 해석 프로그램인 MAXWELL을 사용하여 축대칭 모델링으로 나타낸 모델이다. 이에 따라 설계된 초기 모델 사양을 Table 1에 나타내었다. Table 2는 리니어 전자기 발전기의 각 구성 요소에 대해 MAXWELL 프로그램에서 제공한 재료 및 물성을 나타내었다. 코일은 직경이 0.405mm 인 AWG 26을 사용하여 1860turn인 단상의 코일 턴 수를 가진다. 과도상태해석(Transient Analysis)을 수행하여 시간에 따라 리니어 전자기 발전기의 발전량을 확인하는 시뮬레이션을 진행하였으며 해석 시간은 0.3s 이고 시간 간격(Time step)은 0.5ms 으로 적용하였다. Fig. 3는 MAXWELL을 통해 무부하 조건으로 해석된 리니어 발전기에 대한 유도 전압과 전류(Induced Voltage and Current)를 나타내었

Table 1 Axial-symmetric view linear generator Spec.(in MAXWELL)

Indication	Name	Specification
		[mm]
A	Height of Core	10
B	Height of Magnet	20
C	Thickness of Core	10
D	Height of Coil	40
E	Thickness of Coil	10
F	Air-gap	5

Table 2 Properties of Linear Generator

Name	Properties		
Magnet	NdFe_35		
Core	Steel_1010		
Coil	Copper	Number of turns	1860
		Resistance(Ω)	54.81

으며, 발전되는 전압과 전류의 평균치의 경우 각각 6.7987V, 0.1240A 로 나타났다. 이때 발생하는 발전량의 경우 약 840mW 로 도출되었다.

4. 최적 설계

본 연구에서는 리니어 전자기 발전기가 전력감지 시스템의 구동 전력인 100mW를 충족하는지 확인하기 위해 전자기 시뮬레이션을 수행했으며 발전량이 약 840mW 가 도출되는 것을 확인하였다. 이를 통해 리니어 전자기 발전기가 변압기에서 발생하는 기계적 진동을 에너지 하베스팅을 통해 전력감지 시스템을 구동시키는 발전량이 충분히 발생하는 가능성을 보였다. 하지만 제작된 리니어 전자기 발전기를 실제 변압기 내부에 적용하기에는 전체적인 형상 크기의 한계가 있다. 리니어 전자기 발전기의 전체적인 크기는 변압기의 내부에서 발전기 설치를 위한 내부 공간이 제한되어 있기 때문에, 발전기의 전체 크기 또한 제한되어야 한다. 그리고 제한된 리니어 전자기 발전기의 형상 내에서 전력량이 최대가 되는 형상을 설계하기 위해 내부 인자들에 대

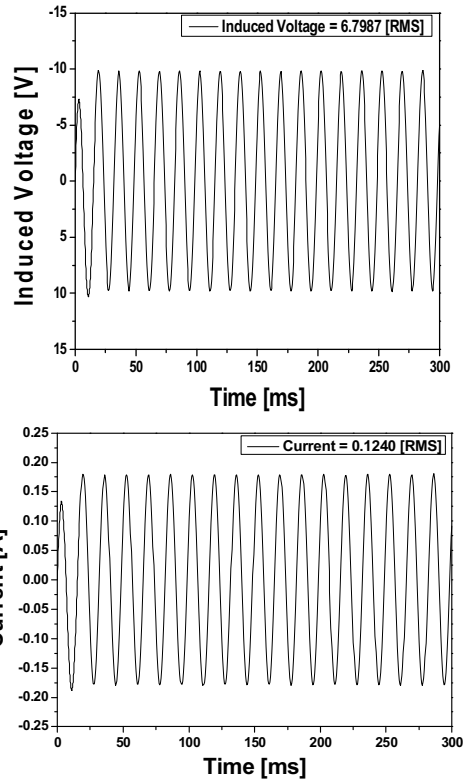


Fig. 3 Transient analysis results of generation(induced voltage and current)

한 최적의 설계가 필요하다. 따라서 제한적인 형상 크기 내에서 최대 전력량을 생산하는 리니어 전자기 발전기 설계를 위해 설계제한 조건을 주어 각각의 설계변수를 도출하였으며 이를 이용하여 리니어 전자기 발전기의 최대 전력량을 내기 위한 내부 인자의 형상에 대해 최적 설계를 수행하였다.

4.1 설계 변수 및 제한 조건

본 연구에 의해 제작된 초기 리니어 전자기 발전기의 시제품은 전체 축 방향 길이와 직경이 140mm, 80mm 이다. 이를 실제 변압기에 부착하여 적용하기에는 제작된 리니어 전자기 발전기의 전체적인 크기에 대한 한계점이 있다. 따라서 새롭게 제안된 변압기 내부에 적용될 리니어 전자기 발전기의 전체적인 형상 크기인 축 방향 길이는 80mm,

직경은 140mm 으로 제한된 설계가 되어야 하며 원활한 축 방향 왕복운동이 가능하도록 축(Shaft)와 스프링(Spring)이 적용되는 공간을 제외한 전기자 부분의 축 방향 길이는 60mm 로 제한되어야 한다. 이에 따라 리니어 전자기 발전기 내부의 전기자 부분인 코어와 영구자석의 축 방향 길이는 60mm 로 설계되어야 하며 고정자 부분의 코일 축 방향 권선 또한 최대 60mm 이내로 제한되어야 한다. 또한 발전기의 최대 직경인 140mm 이내에서 전기자의 직경 및 코일의 직경방향 권선 또한 결정되어야 한다. 이러한 제한된 설계범위 내에서 최대 발전량을 구현하기 위해 고려할 설계 변수는 리니어 전자기 발전기의 3차원 형상인 Fig. 4와 같이 영구자석의 축 방향 길이인 H_{magnet} 과 반경 방향 두께인 W_{magnet} , 코일의 축 방향 권선인 H_{coil} 로 결정하였다. 영구자석의 경우 실제 가공되는 H_{magnet} 이 5mm 이하이면 너무 작아 휘거나 부서질 수 있는 실제 가공에 대한 어려운 문제점이 있는 반면 25mm 이상일 경우 영구자석의 크기 및 무게가 증가하여 리니어 전자기 발전기의 형상의 최대 제한 조건을 만족하지 못하고 실제 영구자석을 가공을 하여도 영구자석의 반발력으로 인해 조립을 하지 못하는 문제점이 있다. 따라서 설정된 설계 변수인 영구자석의 경우 설계 제한 조건이 최소 축 방향 가공 길이인 5mm 이상이며 최대 25mm 이하여야 한다.

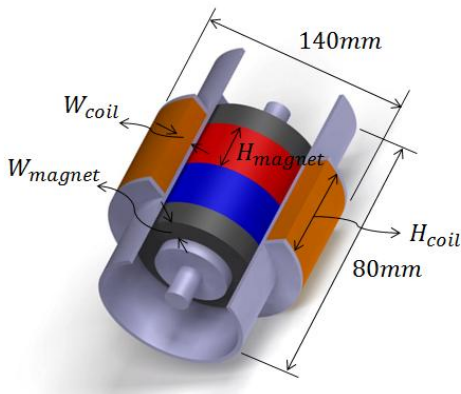


Fig. 4 Design variables of linear generator

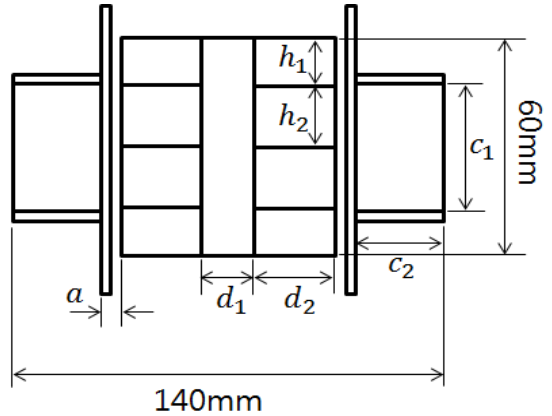


Fig. 5 2-D design parameters of linear generator

Table 4 Table of orthogonal arrays

case	Design variable			Response
	h_2 (mm)	d_2 (mm)	c_1 (mm)	Power(w)
1	5	5	5	0.007394
2	5	11.25	18.75	0.003929
3	5	17.5	32.5	0.001847
4	5	23.75	46.25	0.000893
5	5	30	60	0.000474
6	10	5	18.75	0.017896
7	10	11.25	32.5	0.017513
8	10	17.5	60	0.00422
9	10	23.75	5	0.471424
10	10	30	46.25	0.029131
11	15	5	32.5	0.018377
12	15	11.25	60	0.01051
13	15	17.5	46.25	0.05434
14	15	23.75	18.75	0.718559
15	15	30	5	2.192924
16	20	5	46.25	0.015471
17	20	11.25	5	0.670064
18	20	17.5	18.75	0.810089
19	20	23.75	60	0.109859
20	20	30	32.5	1.319651
21	25	5	60	0.011143
22	25	11.25	46.25	0.134893
23	25	17.5	5	2.006655
24	25	23.75	32.5	1.312033
25	25	30	18.75	4.482131

Table 3 Initial, lower limit and upper limit of design variables

Design variable	Lower Bound	Initial	Upper Bound
h_2	5	20	25
d_2	5	10	30
c_1	5	40	60

또한 W_{magnet} 의 경우도 가공 및 조립에 대한 어려움으로 인해 최소 5mm 보다 크고 30mm 보다 작아야하는 설계 제한 조건을 가진다. 또한 전기자의 영구자석이 위, 아래로 왕복운동 할 때 고정자의 코일단자를 통과하여야 기전력이 생성되기 때문에 H_{coil} 도 영구자석의 최소 가공인 최소 5mm 이상 전기자의 최대 제한조건인 60mm 이하로 제한된 설계 조건을 가진다. 종속변수인 코어의 크기 및 코일의 반경방향 권선 W_{coil} 는 독립변수의 설계 범위가 결정된 후 설계 범위가 설정된다.

4.2 설계 변수 및 설계의 정식화

제한적인 형상 크기 내에서 최대 전력량을 생산하는 리니어 전자기 발전기 설계를 위해 식(2)의 Faraday 전자기 유도법칙을 참고하였다.

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dz} \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

식(2)에서 발전량은 자기선속의 변화량 $\frac{d\Phi}{dt}$ 과 코일의 턴 수 N에 비례한다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 자기선속에 영향을 끼치는 자석의 치수와 코일 턴 수를 설계 변수로 선정하였으며 아래에 본 연구에서 설정한 설계 변수 및 설계 변수의 제한 조건을 수식으로 나타내었다. 이 때 설계 변수는 Fig. 5에 나타난 것처럼 자석의 축 방향 길이, 반경방향 두께, 코일의 축 방향 권선인 h_2, d_2, c_1 인 3가지로 선정하였다. 설계 변수의 초기 값과 하한 값, 상한 값은 Table 3에 나타내었다. 주어진 설계 요구사항을 만족하는 설계변수를 찾기 위해 설계

문제를 정식화하면 다음과 같다.

$$\text{Find } h_2, d_2, c_1$$

To maximize generator power

Subject to

$$\frac{d_1}{2} + d_2 + a + c_2 = 70\text{mm}$$

$$h_1 + h_2 = 30\text{mm}$$

$$5\text{mm} \leq h_2 \leq 25\text{mm}$$

$$5\text{mm} \leq d_2 \leq 30\text{mm}$$

$$5\text{mm} \leq c_1 \leq 60\text{mm}$$

$$\text{when } a = 5\text{mm (공극)}$$

$$\frac{d_1}{2} = 15\text{mm (샤프트의 반경방향두께)}$$

5. 실험 계획

5.1 실험계획법

본 연구에서는 설계변수의 개수와 수준을 고려하여 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization)틀인 PIANO(Process Integration, Automation and Optimization)를 활용하였다. PIANO에서 제공하는 직교 배열표 중 하나인 $L_{25}(5^6)$ 을 이용하여 3변수, 5수준의 실험계획법을 세웠다. 다음의 직교 배열표인 Table 4에 나타난 25개의 실험 점을 이용하여 각 설계 변수에 따른 리니어 전자기 발전기를 모델링 후 상용 전자기 해석 프로그램 MAXWELL을 활용하여 유한요소해석을 수행하였다^[10,11]. 전자기 해석의 경우 무부하 해석을 수행하였으며 앞서 수행하였던 초기 모델에 대한 사용된 재료의 물성, 해석시간, 해석방법을 동일하게 수행하였다.

5.2 근사화기법

근사모델은 관심영역 일부분이나 전체적인 영역에서 실제 해석모델의 반응 값과 변수 값과의 관계

를 근사화 한다^[12]. 실험계획법에서 생성한 직교 배열표의 결과로부터 다양한 모델 중 근사모델인 크리깅모델을 생성하였다. 대표적인 보간 모델인 크리깅은 설계변수가 많고 비선형성인 시스템에서 우수한 예측성능을 보이고, 알고 있는 주위의 값들을 선형적인 조합으로 예측하는 통계학적 기법이다. 이를 25개의 실험 점에 대한 시뮬레이션 해석 결과를 통해 PIA_nO 프로그램에서 제공하는 근사화 기법을 이용하여 크리깅 모델을 생성하였다^[13,14].

5.3 최적화기법

근사화된 모델을 이용하여 최적설계를 진행하기 위해 진화알고리즘(Evolution Algorithm: EA)을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 진화 알고리즘은 확률론적 최적화 기법의 하나로써 설정한 설계 변수인 부모 개체군으로부터 일정한 범위 내에서 확률 변수를 발생시켜 차기 개체군을 생성 시킨다.

Table 5 Result of optimization

Design variable	Lower Bound	optimum	Initial	Upper Bound
h_2	5	24.656	20	25
d_2	5	29.838	10	30
c_1	5	5.620	40	60

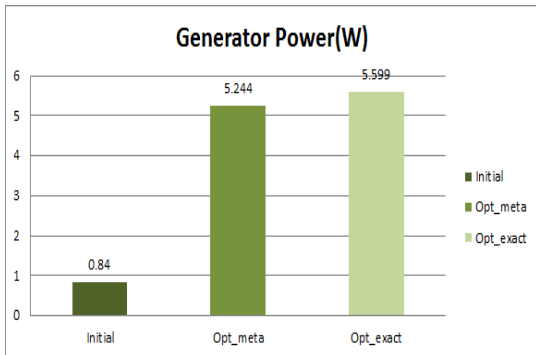


Fig. 6 Comparison of the generator power

부모개체군과 차기 개체군을 통해 원하는 설계 목표에 가장 근접한 변수를 선택하여 설계 변수를 재구성한다. 실험계획법과 근사화 기법을 통해 크리깅 모델 성능 정확도를 확인하였고 진화알고리즘을 사용하여 Table 5에 최적화 값을 통해 도출된 변수 값을 확인하였다^[15].

6. 최적설계 결과

진화알고리즘을 통해 최적설계를 수행한 결과 근사모델을 이용한 최적설계 결과 도출된 발전량이 약 5.244W 가 나왔으며 이는 제한된 범위 내에서 전력감지시스템을 구동시키기 위한 구동전력을 충분히 충족하며 초기 값 대비 약 524% 증가한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 근사모델을 이용한 최적설계를 수행하였기 때문에 근사모델인 크리깅 모델의 정확도에 따라 최적 설계 결과가 달라질 수 있다.따라서 최적화 결과의 정확도를 실제 해석을 통해 검증되어야 하므로 크리깅 설계 결과 (Opt_meta)와 Maxwell해석 결과(Opt_exact)를 Fig. 6에 나타내었고 서로 비교하였다. 비교 결과, 리니어 전자기 발전기의 발전량 결과는 근사 모델을 이용한 설계결과(Opt_meta)에 비해 최적설계를 통해 선정된 변수들을 사용하여 실제 해석에서 나타난 결과(Opt_exact)가 6.7% 증가한 약 5.6W 로 발생하였다. 근사 모델을 이용한 설계결과(Opt_meta)와 Maxwell 해석을 이용한 해석결과(Opt_exact)가 제한된 범위 내에서 전력감지시스템을 구동시키기 위한 구동전력인 100mW 이상을 충분히 충족했다. 최종적으로 최적모델의 3가지 설계변수인 h_2 , d_2 , c_1 에 대해 각각 24.656mm, 29.838mm, 5.620mm로 최적설계 값이 결정 되었다.

7. 결론

본 연구에서는 변압기에서 발생하는 60Hz의 기계적인 주파수를 통해 에너지 하베스팅을 이용하여 전력감지시스템을 구동시키기 위해 리니어 전자기 발전기에 대한 연구를 진행하였다. 이를 통해 리니

어 전자기 발전기의 적용 가능성에 대해 확인하였고 결과를 바탕으로 실제 변압기에 적용하기 위해 제한된 형상 크기 내에서 리니어 전자기 발전기의 최대 발전량을 도출하기 위해 최적 설계를 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 전자기 분석을 통해 주상변압기의 진동에너지를 하베스팅하여 얻은 리니어 전자기 발전기의 발전량이 전력감지시스템의 구동전력을 충족하는지와 적용 가능성을 확인하였고 이를 바탕으로 리니어 전자기 발전기의 적용을 위해 제한된 크기 내에서 최대 발전량을 도출하기 위해 최적 설계를 진행하였다.
2. 설계 인자를 도출하여 설계요구사항 및 설계 제한 조건을 바탕으로 설계문제를 정식화하였으며 실험계획법을 통해 실험 점 도출 및 근사모델 생성하였다. 이를 통해 제한조건 내에서 초기 모델보다 약 524% 증가된 발전량을 생산하는 최적 모델을 도출하였다.
3. 도출된 최적 모델에 대한 전자기 분석 결과 전력감지시스템의 최소 구동조건인 100mW 이상의 발전량을 도출하였고 최대 발전량의 결과 약 5.6W 가 발전되었으며 이에 따라 적용 가능성에 대해 확인하였다.

REFERENCES

1. T. Leibfried, K. Feser., "Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp.1333-1341, 1999.
2. Miso Kim, "Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesting" ,Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 32, No. 5, pp 603~610, 2012. 10.
3. S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha and S Roy., "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting", JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING, Vol. 17, No. 7, 2007.
4. Francesco Cottone., "Introduction to Vibration Energy Harvesting", NiPS Energy Harvesting Summer School, 2011.
5. Dibin Zhu, Michael J Tudor, Stephen P Beeby., "Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review", Measurement Science and Technology, Vol. 21, pp. 1-29, 2009.12.
6. S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White., "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications", Measurement Science and Technology, Vol.17, pp. 175~195, 2006.
7. S. Roundy, E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright, V. Sundararajan. "Improving power output for vibration-based energy scavengers", Pervasive Computing, IEEE, vol. 4, issue 1, pp.28-36, 2005.
8. Yacine Amara, Jiabin Wang, Yacine Amara, Jiabin Wang. "Analytical prediction of eddy-current loss in modular tubular permanent-magnet machines" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, 2005.
9. Virtic P, Pisek P, Marcic T, et al. "Analytical analysis of magnetic field and back electromotive force calculation of an axial-flux permanent magnet synchronous generator with coreless stator". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, pp.4333-4336, 2008.
- 10 Kang, D. M., Kwak J. S., Choi J. W. and Park, K. D., "Optimization for Friction Welding of AZ31 Mg Alloy by Design of Experiments", J.KSMPE, Vol. 10, No. 4, pp. 64-69, 2011.
11. Song, B. C., Bang, I. K., Han, D. S., Han, G. J., Lee, K. H., "Structural Design of a Container Crane Part-Jaw, Using Metamodels", J. KSMPE, Vol.7, No. 3, pp. 17~24, 2008.
12. Ha, H. G., Oh, S. J. and Yee, K. J., "Feasibility Study of Hierarchical Kriging

- Model in the Design Optimization Process," J. of KSAS, Vol. 42, No. 2, pp. 108-118, 2014.
13. Kim, J. G. and Lee K. H., "A Structural Design of Microgyroscope Using Kriging Approximation Model," J. KSMPE, Vol.7, No. 4, pp. 149~154, 2008.
 14. Song, B. C., Kim, S. R., Kang, Y. G., Han, M. H., "A Study on the Comparison of Approximation Models for Multi-Objective Design Optimization of a Tire", J. KSMPE, Vol.10, No.5, pp. 117-124, 2011.
 15. Lim, S. H., Choi, N. S., Kim, N. K. and Kim, D. H., "Optimization of BLDC Motor to Minimize Cogging Torque Using Response Surface Method and Evolutionary Algorithm," Proceedins of KIEE Conference, pp. 213-215, 2010.