

파력에너지 변환을 위한 선형발전기의 최적 설계 방법

김정윤* · 김병수**

An Optimal Design Method of a Linear Generator for Conversion of Wave Energy

Jung-Yoon Kim* · Byung Soo Kim**

요약

본 논문에서는 반응 표면 분석을 이용하여 파력 발전기의 최적 설계 방법을 제안한다. 특히 제안한 방법에서는 파도의 수직 운동을 직접 전기 에너지로 변환하기 위한 선형 운동 가능한 선형발전기를 선택함으로써 기계적 손실을 줄인다. 따라서 에너지 변환 효율 향상을 위해 느린 파 상태에서도 구동 장치에 작용하는 여자력을 계산하고 슬롯과 극의 비율로 권선 과정을 결정한다. 또한 발전기의 성능에 중요한 영향을 미치는 고정자와 변환기의 형상 인자를 도출하기 위해 회귀분석을 사용한다. 반응 표면 분석을 통해 최적의 설계 변수를 선정하고, 분석 결과를 활용하여 효율적인 실험 설계를 위한 최적화 방법을 제시한다. 마지막으로, 모의 실험 결과를 통해 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

ABSTRACT

In this paper, we present an optimal design method for wave power generators using the response surface analysis. Especially, in our method, we reduce the mechanical loss by selecting the linear generator whose linear movement can be converted to the electrical energy directly with the vertical movement of waves. Therefore, we calculate the exciting force acting on the drive device in a slow-wave condition and determine the winding process with a ratio of the slots and poles for the improvement of energy conversion efficiency. In addition, we employ the regression analysis for deriving the shape factors of the stator and the translator, which have a significant effect on the performance of a generator. We choose the best design variables through the response surface analysis, and then we study the optimization method for designing the efficient experiment using the analysis results. Finally, we show the validity of the proposed method through the simulation results.

키워드

Response Surface Analysis, Linear Permanent Magnet Synchronous Generator, Regression Analysis
반응 표면 분석, 선형 영구 자석 동기 발전기, 회귀 분석

1. 서론

해양플랜트 기술의 획기적 발전으로 인해, 고갈 염려가 없으며 공해문제도 없는 미래의 이상적인 에너지

자원인 해양에너지의 개발에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 이들 중 조수간만의 차이를 이용하는 조력발전에 비해 입지 선정이 자유롭고, 연중 무한정 움직임을 가진 파도를 다양한 형태로 발전에 사용할

* 한국전기연구원 고전압평가본부 (kjtist@keri.re.kr) · Received : Oct. 12, 2021, Revised : Nov. 14, 2021, Accepted : Dec. 17, 2021
** 교신저자 : 경기대학교 대학원 전자공학부 · Corresponding Author : Byung-Soo Kim
· Dept. of Electronic Engineering, Kyonggi University,
· 접수일 : 2021. 10. 12 · Email : 20131102133@kyonggi.ac.kr
· 수정완료일 : 2021. 11. 14
· 게재확정일 : 2021. 12. 17

수 있는 파력발전시스템(WEC: Wave Energy Converter)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 에너지 흡수 방식, 설치 장소에 따라 다양한 형태의 파력발전시스템이 개발되었다. 그 중 해수면에서 파도 에너지를 흡수하는 OPT(Ocean Power Technologies)사의 파워 부이(power buoy)와 해저에 설치 후 파도의 수직운동에 의한 수압 차이를 이용하는 AWS(Archimedes Wave Swing)형 파력발전시스템은 파도가 가진 선형운동을 전기 에너지로 변환하는 방식을 이용한다[1], [7]. 이 때 실린더와 피스톤을 통해 선형운동을 회전운동으로 변환시킬 수 있지만 그 과정에서 기계적인 손실이 발생하고, 기계적 구조가 복잡해지며 약한 내구성이 단점으로 알려져 있다. 따라서 선형 운동을 전기 에너지로 직접 변환하기 위한 선형 발전기의 개발이 필수적이다[2-3].

선형 발전기를 이용한 파력발전시스템은 해수면이나 해저의 환경에서 파도의 선형 운동을 직접적인 에너지원으로 이용해야 하므로 동작하는 구동부가 파도에 의해 직접 움직여야 한다. 그러므로 안정적인 시스템을 위하여 가벼운 기체와 간단한 구조로 제작이 용이해야 하고, 에너지 변환 효율도 높아야 한다. 이러한 이유로 인해 현재 파도의 선형운동을 이용한 파력발전시스템은 대부분 영구자석 동기발전기를 사용하고 있다.

영구자석 동기발전기의 경우 구조는 간단하지만 영구 자석과 코어 부의 설계된 형상, 그리고 코어에 감겨있는 권선 법에 따라 성능이 달라진다. 특히 발전기 설계의 기본이 되면서 가장 중요한 요소들 중 하나인 극 당 슬롯 수의 값은 권선 방법과 매우 연관이 있으며, 코깅(cogging)과 출력에도 영향을 미친다[4]. 따라서 극 당 슬롯 수의 값을 설정하는 것으로부터 시작하여 코어와 전체적인 형상을 원하는 성능과 정격을 가지도록 설계해야 한다. 이를 위해서 주어진 조건하에서 최적화 과정을 통해 성능을 최대화하는 것이 필요하나 동기발전기 설계와 같은 공학적인 문제는 설계 변수들이 최적화 대상과 어떤 관계를 갖는지를 수식적으로 나타내기가 매우 어려우므로 대부분의 경우 목적함수가 명시적으로 주어지지 않는다. 또한 기존의 유한 차분법에 기반한 함수의 계산을 사용하는 최적화 방법은 수치해석 시에 발생할 수 있는 다양한 노이즈(noise)에 의해 영향을 받으므로 정확한 계산을

할 수 없게 된다.

근래에 통계학 이론과 공학적 문제를 접목한 실험 계획법을 통하여 최적화하는 방법에 대한 연구가 진행되었으며[5], 이는 실제 모델을 근사화하기 위해 실험을 계획하고 실험 값들을 분석하여 독립변수와 목적함수의 상호 관계를 구하는 방법이다. 이러한 통계적 분석을 통해 나온 결과와 실제 모델과의 적합도를 계산하면 노이즈의 영향을 최소화할 수 있다.

실험계획법은 해결하고자 하는 문제에 대하여 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있도록 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것이다. 실험계획법의 종류는 다양하지만 전기기기의 설계에는 반응 표면 분석법을 주로 사용한다. 이는 통계적 경험 설계와 회귀모델 생성기법을 기반으로 하는 근사기법으로, 반응 표면 분석(response surface analysis)법을 적용한 최적화 알고리즘은 준 전역성을 가지면서도 해석 횟수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 이때 목적함수에 영향을 미치는 유효 인자를 구하고, 구해진 유효 인자에 의한 최적의 조건을 유도할 때 사용이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 임의의 해양 환경에 주어졌을 때 시스템 자체가 받게 되는 힘을 계산하여 구동 장치의 설계를 위한 가진력으로 이용하고, 주어진 조건에서 최적의 성능을 갖는 발전기를 설계하는 방법을 제안한다[6-7]. 각 변수간의 다양한 효과를 다각적으로 분석하여 초기에 설계한 발전기를 반응 표면 분석(response surface analysis)을 통해 얻어진 인자들간의 기여도 및 성능의 가중치를 고려함으로써 최적화한다. 마지막으로, 모의실험을 통해 제안한 설계 방법이 타당함을 검증하고자 한다.

II. 파도의 힘 모델 및 반응 표면 분석법

2.1 파도의 수력학적 힘 모델

파도의 속도 퍼텐셜 ϕ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = (\phi_0 + \phi_a + \phi_r) \quad (1)$$

여기서 ϕ_0 은 입사파(incident wave) 퍼텐셜, ϕ_a 는

회절파(diffraction wave) 퍼텐셜, ϕ_r 은 방사파(radiation wave) 퍼텐셜을 나타내며 선형중첩(linear superposition)이 되어 총 속도 퍼텐셜을 구성하게 된다. 회절 효과와 방사파를 무시한 경우의 힘을 Froude-Krylov 가진력이라고 하며, 식 (2)와 같다.

$$F^{FK} = i w \rho \iint_S \phi_{,n} \cdot dS \quad (2)$$

여기서 w 는 파도의 주파수, ρ 는 유체의 밀도, n 은 수면의 법선 벡터, S 는 물체의 표면을 나타낸다. 윗 식은 계산을 간단히 할 때, 특히 유체 내의 물체 크기가 파도의 파장에 비해 매우 작을 때 유용하다 [6]. 유체 내에서의 입사파 퍼텐셜은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_0 = \frac{aw}{k} e^{kz} Re \{ i e^{i(wt - kx)} \} \quad (3)$$

여기서, a 는 입사파의 진폭, 그리고 k 는 파수를 나타낸다. 물체의 단면적을 B , 수면으로부터 잠긴 깊이를 T 라고 할 때 입사파에 의해 z 축 방향으로 작용한 힘은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_z^{FK} &= Re \left\{ \int_{-B/2}^{B/2} -\rho i w \frac{i a w}{k} e^{-kT} e^{i(wt - kx)} dx \right\} \\ &= Re \left\{ 2\rho \frac{w^2}{k^2} a e^{-kT} e^{iwt} \sin\left(\frac{kB}{2}\right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

이 때, 낮은 주파수 대역에서 파도의 주파수가 영으로 근접한다고 하면, 파수 $k = w^2/g \rightarrow 0$ 이고, $e^{kT} \simeq 1 - kT$ 와 $\sin(kB/2) \simeq kB/2$ 로 근사하여 식 (4)는 식 (5)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_z^{FK} &\simeq Re \left\{ 2\rho \frac{w^2}{k^2} a (1 - kT) \left(\frac{kB}{2}\right) e^{iwt} \right\} \\ &\simeq Re \left\{ \rho g a B \left(1 - \frac{w^2}{g} T\right) e^{iwt} \right\} \\ &\simeq Re \left\{ \rho g B a e^{iwt} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 유체의 밀도와 중력, 진폭 그리고 물체의 단면적을 통해 가진력을 계산할 수 있음을 알 수 있

다. 즉, 시스템이 설치되는 환경의 조건과 본체의 규모 설계를 통해 가진력을 계산하고, 이를 통해 에너지 변환장치의 정격을 정할 수 있다.

2.2 반응 표면 분석법

반응 표면 분석법의 목적은 비선형 독립변수와 종속변수간의 관계를 함수 관계로 정립하고 독립변수 값에 대한 함수의 값을 예측하는 것이다. 이 분석 방법은 비선형 구조 해석 등을 이용한 최적 설계에 많이 이용되고 있으며, 다양한 해석 프로그램과 연계를 통해 최적화 수행을 위한 용도로도 이용되고 있다[8].

실험에 영향을 미치는 변수들을 인자(factor)라 할 때 인자들에 따른 실험 결과들의 추정치들이 통과하는 선이나 면을 반응 표면(response surface)이라 하며, 최적화시키는 함수 값을 반응(response)이라고 한다. 반응을 y 라고 했을 때, 부호화된 인자들 x_1, x_2, \dots 의 함수 f 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots) + e \quad (6)$$

여기서 e 는 잔차(residual)이며, 모델링 오차를 포함한 각종 오차값을 나타낸다. 여기서 실제 반응 함수를 정확하게 수식화 하는 것이 어렵기 때문에 회귀 분석(regression analysis)을 통해 근사화된 함수를 사용한다. 회귀 분석은 실험을 통해 얻어진 자료들을 사용하여 독립변수와 종속변수들 간의 관계를 수학적으로 모델링하여 분석하는 통계적인 기법이다 [9], [10]. 회귀 분석을 이용하여 인자의 변화에 따른 반응 값의 변화 및 최적 반응을 위한 인자들의 조건을 구할 수 있다. 근사 모델은 일반적으로 1차 또는 2차 다항식의 형태가 사용된다. 특히, 2차 근사 모델은 매우 유연하므로 다양한 함수를 표현할 수 있으며, 모델의 계수를 계산하는 것이 간단하다. 최적화의 목적으로 사용하는 반응 표면 분석은 일반적으로 2차 회귀모델을 사용한다. 2차 회귀모델은 반응 표면을 곡면으로 가정하여 다른 모델에 비해 최대, 최소 영역이 확실하게 구별된다. 한편 2차 회귀모델은 식 (7)과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j x_j + \sum_{i=1}^q \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \\ &= \beta_0 + x' \beta + x'_{ij} \beta x_i + \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 β 는 회귀 계수, x 는 독립변수를 나타낸다. 한편 계획된 실험 인자와 실험값 사이의 오차를 최소화하는 회귀 계수는 최소 제곱법을 이용하여 구할 수 있으며 X 는 독립변수의 행렬, y 는 반응값 벡터라고 할 때 식 (8)과 같다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (8)$$

따라서 회귀모델은 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (9)$$

III. 선형 영구자석 동기발전기의 설계

3.1 선형 영구자석 동기발전기의 설계 요소

3.1.1 극 당 슬롯수

슬롯과 극의 수는 전기기기의 성능과 가장 밀접한 관련이 있으므로 설계 초기에 결정해야 하는 값 중의 하나이다 [10]. 특히 슬롯과 극의 비는 유도기전력의 주파수 및 파형과 밀접한 관련이 있으며, 코어와 자석과의 인력에 의해 기기의 구동을 방해하는 코깅에도 영향을 줄 수 있기 때문에, 원하는 발전기 특성에 따라 다양한 조합을 시도할 수 있다. 예를 들어, 3슬롯의 피치를 가지게 되는 4극 12슬롯 조합이 널리 사용되고 있지만 높은 코깅과 큰 단부에 의한 I^2R 의 손실이 발생하게 된다. 기존에는 일반적으로 널리 사용되는 슬롯과 극의 조합들이 있었지만 최근에는 다양한 조합 방법이 개발되어 다양한 응용 분야에서 사용되고 있다 [11].

극 당 슬롯의 조합의 비(ratio)가 정수 또는 분수인 경우에 따라 크게 정수 슬롯 설계와 분수 슬롯 설계로 나눌 수 있으며 각 조합은 내제된 코깅의 특성이 각기 다르다 [12]. 정수 슬롯 설계의 경우에는 극의 개수와 슬롯의 개수의 비가 정수 값이므로 극의 끝부분과 슬롯의 끝부분이 매 주기마다 일치하게 된다.

모서리가 일치하는 시점에 순간적으로 인력이 커지고 코깅이 증가하며 또한 리플이 발생하게 된다. 분수 슬롯 설계의 경우 극과 슬롯의 모서리가 일치하는 빈도가 낮아 코깅을 상당히 감소시키는 효과를 가진다. 자석을 코어에 대해 비스듬히 배치하는 스큐(skew) 방법을 사용하거나 극의 모서리를 부드럽게 가공하는 폴 셰이핑(pole-shaping)을 통해 코깅을 감소시킬 수도 있지만 이것은 정밀 가공이 필요하기 때문에 제작 비용의 관점에서 효율적이지 않다. 따라서 분수 슬롯 설계법을 통해 스큐를 이용하지 않으면서 코깅을 감소하고, 저속에서도 높은 밀도의 자속을 이용할 수 있는 조합을 선택해야 한다. 본 논문에서는 요크(yoke) 폭을 감소하여 발전기의 출력밀도를 향상시킬 수 있는 다극 시스템이 적합하고, 저속의 환경에서 주파수 상승으로 인한 스위칭 손실의 영향을 무시할 수 있어야 하므로 이동자의 총 너비를 고려하여 8극 36 슬롯 모델을 사용한다.

3.1.2 영구자석

선형 영구자석 동기발전기는 영구자석을 통해 자기력을 공급받으므로 사용 용도에 적합한 영구자석을 선택하는 것이 매우 중요하다. 자석의 특성은 감자 곡선을 통해 나타내며 잔류자속(remanent flux) B_r 과 보자력(coercive force) H_c , 그리고 감자 곡선 내의 실제 동작 영역에서 얻어지는 리코일 투자율(recoil permeability) μ_{rrec} 과 같은 인자들을 통해 분석한다. 일반적으로 공극의 자속밀도는 자석의 리코일 곡선으로부터 자기 포텐셜(magnetic potential) 강하에 의해 식 (10)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} h_M = \frac{B_g}{\mu_0 \mu_{rrec}} h_M + \frac{B_g}{\mu_0} g \quad (10)$$

여기서 B_g 는 공극에서의 자속밀도, h_M 은 자석의 길이, g 는 공극의 길이를 나타내고, μ_{rrec} 는 리코일 비투자율이라고 하며 물질의 비투자율 μ_{rec} 을 공극의 투자율 μ_0 로 나누어 구한다. 식 (10)를 정리하면 식 (11)으로 나타낼 수 있다.

$$B_g = \frac{B_r h_M}{h_M + g \mu_{rrec}} \quad (11)$$

즉, 기기에 필요한 공극에서의 자속밀도를 결정하면 나머지 요소들은 자석의 종류와 크기를 선택하여 적절히 맞추어 줄 수 있다. 본 논문에서 설계하는 파력발전용 발전기는 1.5φ 권선에서의 발열과 해수에 의한 냉각 효과를 고려할 경우 120°C 내에서 충분히 견딜 수 있으면서 동시에 소형화를 위해 최대 에너지가 높은 자석이 요구된다. 따라서 전압과 자속의 관계를 고려 시 잔여 자속(B_r)은 약 1.20T, 보자력(H_c)은 약 900kA/m, 리코일 비투자율(σ_{rrec})은 1.1인 NdFeB 자석 N35H를 선택한다.

3.2 초기모델 설계

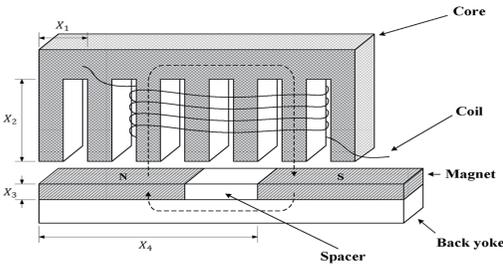


그림 1. 선형발전기의 설계변수
Fig. 1 Design parameters of linear generator

3.1절의 설계요소에 의해 발전기 성능에 영향을 미치는 설계 변수를 선정할 수 있다. 코깅을 저감하기 위해 슬롯과 극의 비율 q 를 4.5로 정하였으므로 슬롯 피치 또는 극 피치를 정격전력의 설정을 위한 변수로 사용한다. 그리고 앞서 권선의 감은 수와 연관된 유도기전력의 크기를 결정하고 슬롯의 크기에 따른 코일 경의 크기를 결정해야 한다. 발전기의 내부 임피던스와 직접적인 관련이 있는 코일경은 흐르는 전류의 밀도에 따라 발열 및 손실에 영향을 주는 중요한 요소이다. 손실 저감을 위해 코일경을 크게 하면 권선 수에 따라 슬롯의 크기가 커지며 이는 중량과 자기회로에 영향을 준다. 따라서 슬롯의 높이를 변수로 설정하고 슬롯의 점적률에 적합한 코일경을 계산할 수 있도록 해야 한다. 마지막으로, 등가 자기회로 분석을 통해 기자력 및 유도기전력에 큰 영향을 미치는 자석의 두께와 극효율의 영향을 고려하여 변수로 설정한다.

따라서 최종적으로 선정한 설계변수로는 슬롯 피치 (X_1), 슬롯 높이(X_2), 자석 높이(X_3), 극효율(X_4)이다. 설계 변수는 그림 1에 표시되어 있고 그림에서 점선은 자속의 순환경로를 나타낸다.

본 논문에서는 설계 변수에 의해 종속되는 목적함수로 발전기의 성능에 가장 중요한 영향을 주는 중량, THD, 코깅의 크기로 선정하였다. 0.7%의 파도 운동 환경에서 10kW급 4층 식 선형 영구자석 동기발전기를 설계한다고 할 때 각 축에서는 2.5kW의 전력을 발전할 수 있어야 한다. 한 축에서 발전되는 전력이 $P = \sqrt{3} VI \cos\theta$ 이고, 역률 $\cos\theta$ 를 0.9라고 가정했을 때 전압과 전류의 곱이 1.6kW의 값에 근접해야 하므로 3상 발전기에서 각 상의 전압을 300V로 설정하고, 전류를 6A 흐르도록 하면 각 축마다 2.5kW의 전력이 나온다는 예측이 가능하다. 내부 임피던스와 전기자 반작용(armature reaction)에 의한 전압강하를 고려하여 일반적으로 5~10% 정도 높은 전압 값으로 사용한다. 따라서 그림 2와 같이 유도기전력의 피크 값을 330V로 계산하였을 때 단자 전압값은 약 300V가 나오는 것을 알 수 있다. 계산된 상당 내부 임피던스의 값은 4.7Ω이며 여기서 6A의 전류가 흐르는 조건을 만족하도록 전기 등가회로 해석을 통해 적당한 부하저항의 값을 선정한다. 이때 부하저항의 값은 55Ω이며 그림 3과 같이 6A의 전류가 흐르며 각 축 당 2.5kW, 총 10kW의 전력이 발전된다. 초기 설계 모델의 사양은 표 1에 정리되어 있다.

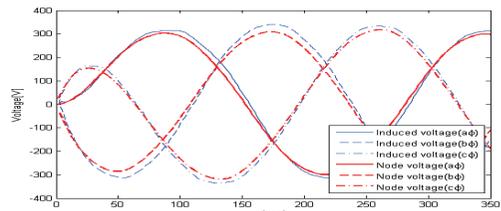


그림 2. 발전기의 상당 유도기전력과 단자 전압
Fig. 2 Induced voltages and node voltages per phase of the generator

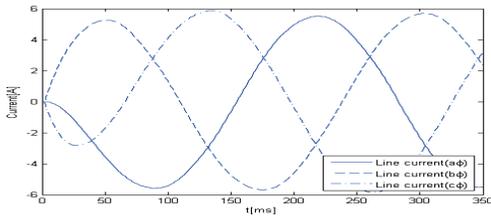


그림 3. 발전기의 상 전류
Fig. 3 Phase currents of the generator

표 1. 초기 설계모델의 사양
Table 1. Specifications for the initial model

Parameters	Value	Unit
Number of coil turns	100	turns
Number of poles	8	
Number of slots	36	
Air gap	4	mm
Pole pitch	90	mm
Slot pitch	20	mm
Slot height	120	mm
Magnetic height	8	mm
Pole arc ratio	0.665	
Operating speed	0.7	m/s
Permanent magnet	NdFeB	N35H

3.3 반응 표면 분석을 통한 최적 조건 도출

본 논문에서는 실험변수로 슬롯 피치(X_1), 슬롯 높이(X_2), 영구자석 높이(X_3), 극호율(X_4)을 선택한다. 발전기의 전체 크기를 결정하는 요소인 슬롯 피치와 높이는 전체적인 출력과 관계가 있다. 자석의 높이와 극호율은 유도기전력 및 THD와 관계가 있는 중요한 요소이다. 중심합성계획법을 사용하기 위해 -1, 0, 1의 세 단계 레벨로 설정하였으며 설계의 한계점에 맞도록 정한 값은 표 2에 나타나 있다.

표 2. 반응 표면 분석을 위한 설계변수 및 레벨
Table 2. Design parameters and levels for response surface analysis

	Design parameters	Lv1	Lv2	Lv3
X_1	Slot pitch	18	20	22
X_2	Slot height	60	80	100
X_3	Permanent magnet height	6	8	10
X_4	Pole arc ratio	0.6	0.66	0.73

목적함수는 발전기의 성능을 나타내는 코깅(Y_1), 중량(Y_2), THD(Y_3)이다. 목적함수의 실험값은 실험을 직접 수행할 수 없는 한계로 인해 유한요소법을 이용한 모의실험의 값을 이용한다. 실험 값에 대한 2차 회귀 분석을 이용한 근사 모델은 식 (12)-(14)과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 473.801 + 32.738X_1 - 0.512X_2 + 109.23X_3 \\
 & + 24.92X_4 + 22.256X_1^2 - 1.844X_2^2 - 5.555X_3^2 \\
 & - 0.536X_4^2 + 2.006X_1X_2 + 7.695X_1X_3 \\
 & + 15.152X_1X_4 + 3.209X_2X_3 - 1.477X_2X_4 \\
 & + 12.893X_3X_4, \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = & 127.493 + 15.136X_1 + 8.254X_2 + 3.348X_3 \\
 & - 0.035X_4 + 0.246X_1^2 + 0.821X_1X_2 \\
 & + 0.335X_1X_3 - 0.003X_1X_4 - 0.009X_3X_4 \tag{13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 3.804 + 0.595X_1 + 0.442X_2 - 0.208X_3 \\
 & - 1.638X_4 + 1.234X_1^2 - 0.071X_2^2 + 0.253X_3^2 \\
 & + 2.319X_4^2 + 0.090X_1X_2 - 0.295X_1X_3 - 0.748X_1X_4 \\
 & + 0.163X_2X_3 - 0.402X_2X_4 + 0.083X_3X_4. \tag{14}
 \end{aligned}$$

식 (12)-(14)를 이용한 각 목적함수별 결정 계수 R^2 의 값은 Y_1 (100%), Y_2 (97.11%), Y_3 (96.80%)로 계산된다. 인자의 수가 반영된 R_{adj}^2 의 값은 각각 Y_1 (100%), Y_2 (94.40%), Y_3 (93.82%)이다. 즉 실제 반응함수와 근사 모델과의 적합도가 매우 높다는 것을 알 수 있다. 세 목적함수를 모두 만족시키기 위해서 어느 특정 목적함수의 목표치를 희생할 수 밖에 없다. 초기 모델을 고려하여 정격 출력 2.5kW의 상황일 때 각 목적함수의 제약조건을 $400 < Y_1 < 460$, $120 < Y_2 < 127$, $4 < Y_3 < 6$ 로 정하고, 목표값은 하한값으로 설정한다. 그러나 여기에서는 저속의 과도 환경에서도 파력발전시스템에 적합한 설계를 위해서 선형 발전기의 성능을 떨어뜨리는 가장 큰 요인인 코깅을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서 목적함수별 가중치를 Y_1 , Y_2 , Y_3 에 각각 3:1:1의 비율로 적용한 해를 구한다. 여기서 통계 자동화 프로그램인 MINITAB을 사용하여 반응 표면 분석법을 확인 한다.

마지막으로 가중치가 적용된 전역 해(global

solution)는 표 3과 같고, 모의실험에 사용된 값은 실제 제작 편의성을 고려하여 반올림된 값을 사용한다.

표 3. 최적화된 설계변수
Table 3. Optimized design parameters

Design parameters	X_1	X_2	X_3	X_4
Optimized solution	18.666	89.494	6.828	0.718
Round off solution	18.6	90	7	0.7

IV. 모의실험 결과 및 고찰

최적화를 수행한 계산된 결과는 표 4에 나타나 있다. 여기서 목적함수 제약조건 내에서 결과의 만족을 나타내는 지표로 만족도(satisfaction level)를 사용하고, 만족도 S 는 식 (15)에 의해 계산한다.

$$S = \frac{(Y - U)}{(T - U)} \times 100 \quad (15)$$

여기서 Y 는 반응, U 는 상한값, T 는 목표값을 나타낸다. 세 목적함수 각각에 대한 만족도는 표 4에 나타나 있으며 가중치를 적용한 종합 만족도는 86%로 나타난다. 비교적 절충할 수 있는 중량과 THD에 대해서는 만족도가 낮지만 코깅에 대한 목적함수는 목표치에 대부분 근접함을 알 수 있다.

표 4. 목적함수별 제약조건과 예측반응 및 만족도
Table 4. Constraints, predicted responses and satisfaction levels by the objective functions

	Object. func.	Lower value	Target value	Upper value	Weight	Predic. response	Satisf. level
Cogging	Mini. value	400	400	460	3	400.08	99%
Weight	Mini. value	120	120	127	1	122.98	57%
THD	Mini. value	4	4	6	1	4.55	73%

설계된 모델을 유한요소법에 의해 검증한 결과가 그림 4~7과 표 5에 나타내었다. 축 당 단자 전압 340V와 상 전류 4.8A에 의해 부하에 정상상태인 전

력 2.5kW가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 7에는 초기 모델과 최종 설계된 모델의 코깅의 파형을 비교하였다. 그림의 결과로부터 RSM을 이용한 최적화 과정에서 코깅에 대한 목적함수에 높은 가중치를 주어 만족도가 높으므로 계획했던 값에 근접함을 알 수 있다. 여기서 코깅의 피크 값 15.7% 감소, 리플률은 23.6%에서 8.2%로 감소하였음을 알 수 있다. 발전기의 중량에 직접적으로 영향을 미치는 자석의 크기, 슬롯의 피치는 최적화된 모델에서 23.3% 감소가 된 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 THD의 값은 증가되었다. THD는 극효율의 변화에 민감하므로 불가피하게 실기 제작을 위하여 값을 반올림할 때 영향을 받게 된다. 그러나 보통 최적화된 극효율은 복잡한 소수로 계산되므로 원하는 값이 나오도록 정밀하게 제작하기 위해서 가공비용이 높아지는 것을 감수해야만 한다. 결론적으로 THD의 상한을 6으로 설정하고 최적화 과정을 통해 범위 내의 값을 얻을 수는 있었으나 이는 비용적인 문제를 반영하고, 가중치가 높은 코깅의 만족도를 높이기 위한 과정임을 알 수 있다. 발전기를 구동시키기 위한 파도의 추력을 한 측만 보았을 때에 초기 모델의 경우 0.7%의 파도환경에서 4.12kN의 추력에 의해 운전될 경우 2.64kW의 전력을 발전하며 91.5%의 효율이 나오지만, 최종 설계 모델의 경우 3.58kN의 추력에 의해 2.46kW의 전력을 발전하며 98.0%의 효율을 나타낸다. 이는 최적화 과정에서 중량 뿐만 아니라 코깅의 크기와 리플의 저감에 의해 전체적인 손실이 줄면서 효율이 높아진 것으로 해석할 수 있다. 최종 모델의 설계 사양은 표 6에 나타나 있다.

표 5. 초기모델과 최적모델 결과 비교
Table 5. Comparison of the initial and optimized models

Objective function	Initial model	Optimized model	FEM verification	Rate of change
Cogging (N)	483	400.08	407	-15.7%
Weight (kg)	160.5	122.98	123.1	-23.3%
THD (%)	4.133	4.55	5.740	+38.8%

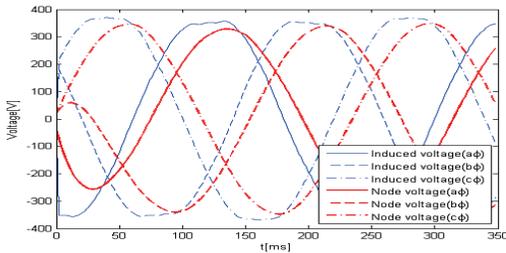


그림 4. 최종 설계모델의 유도기전력과 단자 전압

Fig. 4 Induced voltages and node voltages for the optimized model

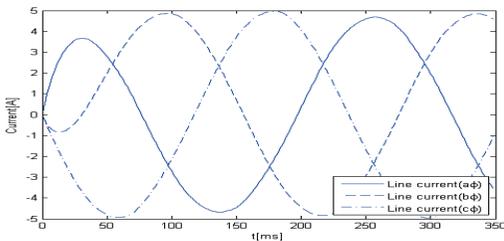


그림 5. 최종 설계모델의 상 전류

Fig. 5 Phase currents for the optimized model

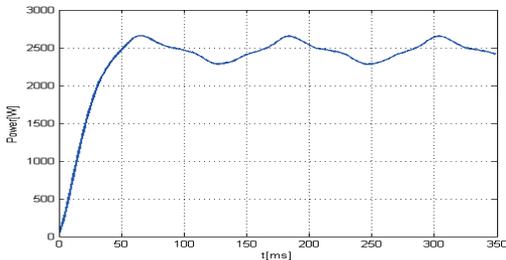


그림 6. 최종 설계모델에서 발전되는 전력

Fig. 6 Power generated by the optimized model

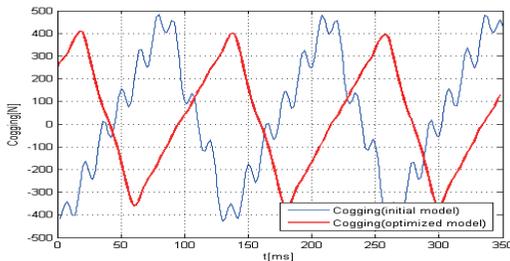


그림 7. 초기모델과 최종 설계모델의 코깅 특성 비교

Fig. 7 Cogging for the initial and optimized models

표 6. 최종 설계모델의 사양

Table 6. Specifications of the optimized model

Variables	Value	Unit
Number of coil turns	100	turns
Number of poles	8	
Number of slots	36	
Air gap	4	mm
Pole pitch	83.7	mm
Slot pitch	18.6	mm
Slot height	90	mm
Magnetic height	7	mm
Pole arc ratio	0.7	
Operating speed	0.7	m/s
Permanent magnet	NdFeB	N35H

V. 결론

본 논문에서는 파도의 상하 동요 운동을 이용하여 전력을 발전하는 파력시스템에 적합한 선형 영구 자석 동기 발전기를 설계하였고, 근사 모델의 도출을 통해 최적화하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법에서는 파도의 수력학적 힘 모델을 분석하여 발전기의 사양을 결정하였고, 발전기의 설계 이론을 이용해 슬롯 피치, 슬롯의 높이, 자석의 높이 그리고 극호율을 설계 변수로 설정하였다. 최소의 실험으로 정확한 모델의 근사화를 위해 반응 표면 분석법을 이용하였고, 2차 근사 곡면을 구성하여 코깅, 중량, THD의 각 목적함수에 가중치가 적용된 진역 해를 구해 최적화된 모델을 설계하였다. 최종적으로 초기 모델과 최종 설계 모델의 반응 값과 만족도를 통해 성능을 분석하였고, 모의실험 결과를 통해 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

Reference

- [1] H. Polinder, M. E. C. Damen, and F. Gadner, "Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 3, 2004, pp. 583-589.
- [2] O. Danielsson, M. Eriksson, and M. Leijon, "Study of a longitudinal flux permanent magnet linear generator for wave energy converters,"

Int. J. of Energy Research, no. 30, 2006, pp. 1130-1145.

- [3] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas, and J. A. Tegopoulos, "Power generator optimization from sea waves by using a permanent magnet linear generator drive," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 44, no. 6, 2008, pp. 1530-1533.
- [4] S. E. Skaar, O. Krovel, and R. Nilssen, "Distribution, coil-span and winding factors for PM machines with concentrated windings," *Proc. of Int. Conf. on Electrical Machines 2006, Chania, Greece 2006*, pp. 2-5.
- [5] L. Huang, H. Yu, M. Hu, J. Zhao, and Z. Cheng, "A novel flux-switching permanent-magnet linear generator for wave energy extraction application," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 47, no. 5, 2011, pp. 1034-1037.
- [6] J. Falnes, *Ocean waves and oscillating systems*. U.K. Cambridge University Press, 2002.
- [7] J. Kim, "Optimal Design of Linear Permanent Magnet Synchronous Generator for Wave Energy Converter using Response Surface Analysis," Master's thesis, *Yonsei University*, 2013.
- [8] T. Ryu and J. Yoo, "Multi-Objective Geometric Optimal Design of a Linear Induction Motor Using Design of Experiments and the Sequential Response Surface Method," *The Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 33, no. 33, 2009, pp. 726-732.
- [9] S. Park and J. Kim, *Modern Design of Experiments*. Seoul. Minyoungsa, 2011.
- [10] T. Lee, *Practical Regression analysis using Minitab*. Paju. FREEACADEMY INC, 2011.
- [11] J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, *Design of brushless permanent-magnet motors*. U.K. Oxford Science Publications, 1994.
- [12] K. Lee and J. Lee, "Effect of Pole to slot Ratio on Cogging Torque and EMF Waveform in Permanent Magnet Motor with Fractional-Slot," *The Trans. of the Korea Institute of Electrical Engineers B*, vol. 52B, no. 9, 2003, pp. 454-459.

저자 소개



김정윤(Jung-Yoon Kim)

2012년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학사)

2014년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사)

2014년 한국전력공사 사원

2015년 ~ 현재 한국전기연구원 선임연구원 재직

※ 관심분야 : 제어공학, 지능형전력기기, 전기차 충전시스템



김병수(Byung-Soo Kim)

2005년 경기대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2007년 경기대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2015년 경기대학교 대학원 전자공학과 수료

※ 관심분야 : 제어계측, 지능제어, 로봇틱스,

