

Identification of Key Design Variables for AFPM Using Sobol Global Sensitivity Analysis

Ye-Seo Lee

Department of Next Generation Energy System Convergence, Gachon University, Seongnam 13120, South Korea

In-Jun Yang*

Department of Electrical and Control Engineering, Cheongju University, Cheongju 28503, South Korea

(Received 14 July 2026, Received in final form 20 August 2026, Accepted 24 August 2026)

In this paper, Sobol global sensitivity analysis was performed to investigate the variation in the influence of design variables according to the outer diameter of an axial-flux permanent magnet motor (AFPM). AFPM models with outer diameters of 50 mm, 150 mm, and 250 mm were selected as the analysis targets. A total of eight geometric variables were considered as design variables: magnet thickness, magnet spacing, rotor back-yoke thickness, air-gap thickness, shoe thickness, stator back-yoke thickness, slot opening thickness, and slot width. Design of experiments (DOE) conditions were generated based on a Sobol sequence, and Quasi-3D analysis was performed for each condition to calculate torque, torque ripple, torque density, and voltage total harmonic distortion (THD). The total Sobol index for each performance index was then calculated to identify the dominant design variables for both single performance indices and multiple performance-index combinations. The results confirmed that, even when the same design variables are applied, the variables that should be prioritized in AFPM optimal design vary depending on the outer diameter and target performance index. The results of this study can be used to select dominant design variables for each outer diameter and to reduce the design space in subsequent optimization stages.

Keywords : Sobol global sensitivity analysis, design variables, AFPM, FEA

Sobol 전역 민감도 분석을 이용한 AFPM 주요 설계 변수 도출

이에서

가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과, 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342, 13120

양인준*

청주대학교 전기제어공학과, 충청북도 청주시 청원구 대성로 298, 28503

(2026년 7월 14일 받음, 2026년 8월 20일 최종수정본 받음, 2026년 8월 24일 게재확정)

본 논문에서는 외경 변화에 따른 축방향 자속 영구자석 전동기(axial-flux permanent magnet motor, AFPM)의 설계 변수 영향도 변화를 분석하기 위해 Sobol 전역 민감도 분석을 수행하였다. 분석 대상은 외경 50 mm, 150 mm, 250 mm의 AFPM 모델로 선정하였으며, 자석 두께, 자석 간격, 회전자 백요크 두께, 공극 두께, 슈 두께, 고정자 백요크 두께, 슬롯 오프닝 두께 및 슬롯 너비의 총 8개 형상 변수를 설계 변수로 선정하였다. Sobol sequence 기반으로 실험계획법(design of experiment, DOE) 조건을 생성하고, 각 조건에 대해 Quasi-3D 해석을 수행하여 토크, 토크리플, 토크밀도 및 전압 총고조파왜율(voltage total harmonic distortion, voltage THD)을 산출하였다. 이후 각 성능 지표에 대한 total Sobol index를 계산하여 단일 성능 지표 및 복수 성능 지표 조합에 따른 주요 설계 변수를 도출하였다. 이를 통해 AFPM 최적설계에서는 동일한 종류의 설계 변수를 적용하더라도 외경과 설계간섭 범위와 목표 성능 지표에 따라 우선적으로 고려해야 할 변수가 달라짐을 확인하였다. 본 연구 결과는 외경별 주요 설계 변수 선정과 후속 최적화 단계에서의 설계 공간 축소에 활용될 수 있다.

주제어 : Sobol 전역 민감도 분석, 설계 변수, AFPM, 유한요소해석

I. 서 론

최근 전기차 구동계는 단순한 효율 향상을 넘어 고효율밀도와 경량화를 동시에 요구하는 방향으로 발전하고 있다[1]. 특히 전동화 차량의 인휠 드라이브 시스템은 구동 모터를 차량 휠 내부에 장착해야 하므로, 모터의 박형화 및 소형화에 대한 요구가 더욱 증가하고 있다[2]. 이에 대해 축방향 자속 영구자석 전동기(axial flux permanent magnet motor, AFPM)이 연구의 대상이 되고 있다.

AFPM은 자속이 축방향으로 형성되는 전동기로, 축방향 공간이 제한된 구조에서 유리한 특성을 가진다[3]. 기존 연구에서는 반경방향 자속 영구자석 전동기(radial flux permanent magnet motor, RFPM)와 AFPM의 토크밀도를 비교하고 AFPM의 토크밀도를 향상시키기 위한 형상 연구[4,5], AFPM의 해석 간소화를 위한 자기 등가회로 기반 해석에 대한 연구[6], 그리고 RFPM과 달리 3차원 해석이 요구되는 AFPM의 빠른 설계를 위한 Quasi-3D 해석 기법 연구[7]가 진행되었다.

전동기 설계 분야에서는 설계 변수 증가에 따른 계산 비용을 줄이고 최적 설계안을 도출하기 위해 다양한 최적화 기법과 민감도 분석이 적용되어 왔다. 기존 연구에서는 영구자석 전동기의 설계 최적화 방법을 비교하거나[8], 제조 공차가 토크와 토크리플에 미치는 영향을 Sobol sequence 기반으로 분석하였다[9]. 그러나 이러한 연구들은 주로 특정 전동기 모델 또는 특정 성능 지표에 대한 영향도 분석에 초점을 두고 있으며, AFPM의 외경 변화에 따라 주요 설계 변수가 어떻게 달라지는지를 단일 성능 지표 및 복수 성능 지표 조합 관점에서 비교한 연구는 부족하다. 따라서 본 논문에서는 외경 50 mm, 150 mm, 250 mm AFPM 모델을 대상으로 Sobol 전역 민감도 분석을 수행하여, 외경별 설계 가능 범위 내에서 우선적으로 고려해야 할 주요 설계 변수를 도출한다.

AFPM은 토크가 외경의 세제곱에 비례하는 특성을 가지므로, 외경 변화는 토크 성능에 직접적인 영향을 미친다[10]. 또한 출력 성능은 내외경비를 포함한 다양한 설계 변수의 조합으로 결정되기 때문에, 동일한 설계변수라 하더라도 외경 조건에 따라 성능에 미치는 영향도가 달라질 수 있다. 전동기 설계에서 형상 변수를 다양하게 고려하는 것은 목표 성능에 부합하는 설계안을 탐색하는 데 유리하다. 그러나 설계 변수가 증가할수록 해석 케이스가 증가하며, 이는 계산 비용 및 소요 시간의 증가로 이어진다. 특히, 축방향 자속 구조를 갖는 AFPM은 RFPM과 동일한 원리로 구동되지만, 반경 방향에 따라 전자기 특성이 변화하는 구조적 특성으로 인해 3차원 해석이 요구된다. 따라서 설계 변수 증가 시 해석 시간이 크게 증가하는 한계가 있다. 이에 따라 효율적인 설계를 위해서는 설계 공간을 축소하고, 성능에 지배적인 영향을 미치

는 주요 설계 변수를 선정하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 Sobol 전역 민감도 분석을 적용하여 외경 크기별 목표 성능 지표에 대한 주요 설계 변수를 도출한다. Sobol 전역 민감도 분석은 출력 응답의 분산을 각 입력 변수 및 변수 조합의 기여도로 분해하여 설계 변수가 목표 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법이다. 특히, 개별 변수의 독립적인 영향과 변수 간 상호작용에 의한 영향을 함께 분석할 수 있어, 복수의 설계 변수가 동시에 성능에 영향을 미치는 전동기 설계에 적합하다.

이에 본 연구에서는 전동기 외경 변화에 따라 영향도가 큰 단일 변수와 변수 조합을 분석하고, 목표 성능 지표별 주요 설계 변수의 차이를 비교한다. 이를 통해 설계 공간을 효과적으로 축소하여 해석 시간을 저감하고, 후속 최적화 연구를 위한 주요 설계 변수 선정에 기여하고자 한다.

II. Sobol 전역 민감도 분석

민감도 분석은 모델 출력값의 변화가 어떤 입력 변수에 의해 발생하는지 평가하는 방법으로, 출력의 불확실성을 입력 변수의 여러 불확실성 원인으로 분해하여 해석하는 과정으로 정의할 수 있다. 이 중 Sobol 전역 민감도 분석은 함수 분해를 기반으로 출력 분산을 각 입력 변수의 기여도로 나누어 평가하는 방법이다. 특정 기준점에서 도함수를 이용하여 변수의 영향을 평가하는 국부 민감도 분석과 달리, 입력 변수의 전체 범위에서 개별 변수와 변수 조합이 출력에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

식(1)은 출력 함수를 평균 성분, 단일 변수에 의한 영향, 변수 간 상호작용에 의한 영향으로 분해한 것을 나타낸다. 이때, 출력의 전체 분산은 식(2)와 같이 각 변수 또는 변수 조합에 의해 발생하는 분산 성분의 합으로 표현된다. Sobol index는 식(3)과 같이 특정 변수 또는 변수 조합에 의한 분산이 전체 분산에서 차지하는 비율로 정의된다. 따라서 Sobol index가 큰 변수는 출력값에 대한 민감도가 높은 주요 변수로 판단할 수 있고, 반대로 Sobol index가 작은 변수는 출력에 미치는 영향이 작은 변수로 판단할 수 있다[11-13]. 이러한 결과를 바탕으로 영향도가 낮은 변수는 고정하고, 영향도가 큰 변수는 후속 최적화를 수행하여 효율적인 변수 선정이 가능하다.

$$f(x) = f_0 + \sum_i f_i(x_i) + \sum_{i < j} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{12\dots n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$D = \sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} D_{i_1 \dots i_s} \quad (2)$$

$$s_{i_1 \dots i_s} = \frac{D_{i_1 \dots i_s}}{D} \quad (3)$$

III. 분석 대상 및 조건

1. 분석 대상 및 기본 해석 조건

본 논문은 외경 변화에 따른 AFPM의 설계 변수 영향도 변화를 분석하기 위해 서로 다른 외경을 갖는 모델을 대상으로 한다. 분석 대상은 소형부터 중대형 크기까지의 AFPM을 포함하도록 구성하였으며, 전동기 외경별 주요 설계 변수가 민감도에 미치는 영향을 비교한다. AFPM은 토크가 외경의 세제곱에 비례하는 특성을 가지므로, 외경 변화는 토크 및 토크밀도와 같은 성능 지표에 영향을 미친다. 또한 동일한 설계 변수라 하더라도 외경 조건에 따라 고조파 성분과 토크 리플 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 목표 성능 지표를 토크, 토크리플, 부피 기준 토크밀도 및 전압 총고조파왜율(voltage total harmonic distortion, voltage THD)로 설정하고, 외경이 다른 모델을 대상으로 Sobol 전역 민감도 분석을 수행하였다.

분석 대상 AFPM은 동일한 극수/슬롯수, 내·외경비, 운전 속도를 갖도록 설정하였다. 내·외경비는 모든 외경 조건에서 동일하게 유지하였고, 동일한 회전 속도와 전류 조건을 적용하였다. 영구자석, 회전자 및 고정자 코어 재질도 동일하게 설정하였다. 이를 통해 외경별 모델 간 비교에서 기본 운전 조건 및 재질 차이에 의한 영향을 최소화하였다. Table I은 본 연구에서 사용한 AFPM의 기본 설계 및 해석 조건을 나타낸다.

한편, AFPM은 자속이 축방향으로 형성되는 구조적 특성으로 인해 3차원 해석이 요구된다. 정밀한 해석을 위해서는 3D 유한요소해석이 필요하지만, 계산 시간이 길어 많은 샘플링이 요구되는 Sobol 분석에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 계산 효율을 고려하여 Quasi-3D 해석 기법을 적용하였다.

2. 설계 변수 및 범위 선정

각 외경 모델에는 동일한 종류의 8개 설계 변수를 적용하

Table I. Basic design and analysis conditions of AFPM models.

Item	Value	Unit
Inner/Outer Diameter Ratio	0.6	-
Pole/Slot	16 / 18	-
Rated Speed	3500	rpm
Current	3.5	A _{rms}
Magnet Material	N42UH	-
Core Material	Soft magnetic composite (SMC)	-
Winding Material	Copper	-

였으며, 변수 범위는 외경별 권선 공간, 치 폭, 공극 조건 및 제작 가능성을 고려하여 설정하였다. 본 연구에서는 외경 변화에 따른 주요 설계 변수의 변화를 분석하기 위해 외경 50 mm, 150 mm, 250 mm 모델을 대상으로 하였고, 토크 성능, 고조파 성분에 영향을 주는 주요 형상 변수를 설계 변수로 선정하였다. 선정한 설계 변수는 Fig. 1과 같다. 이때, 모든 외경 모델에 동일한 절대 치수 범위를 적용할 경우, 소형 모델에서는 슬롯 공간 부족, 치 폭 감소, 공극 및 슬롯오프닝 감소 등으로 인해 제작 또는 해석이 불가능한 형상이 발생할 수 있다. 반대로 대형 모델에서는 동일한 치수 변화가 전체 형상에 비해 상대적으로 작게 작용하여 실제 설계 가능 범위를 반영하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 각 외경 모델에서 물리적으로 성립 가능한 설계 공간을 구성하기 위해 외경별로 설계 변수 범위를 다르게 설정하였다.

설계 변수의 범위는 내외경비, 권선 공간, 치 폭, 공극 조건, 자속 포화 및 제작 가능성을 고려하여 선정하였다. 자석 두께와 자석 간 간격은 외경 증가에 따른 자속 발생 면적과 극 피치 변화를 고려하여 설정하였고, 회전자 및 고정자 백요크는 자석 두께에 대한 비율 변수로 정의하여 외경 변화에도 동일한 상대적 설계 기준을 유지하였다. 공극 두께는 토크 성능과 조립 공차, 축방향 변형 가능성을 고려하여 최소값을 제한하였고, 슬롯 오프닝 두께와 슬롯 너비는 권선 삽입 가능성, 치 폭 확보 및 치 포화를 고려하여 외경별 범위를 선정하였다. Table II는 적용한 설계 변수와 외경별 범위

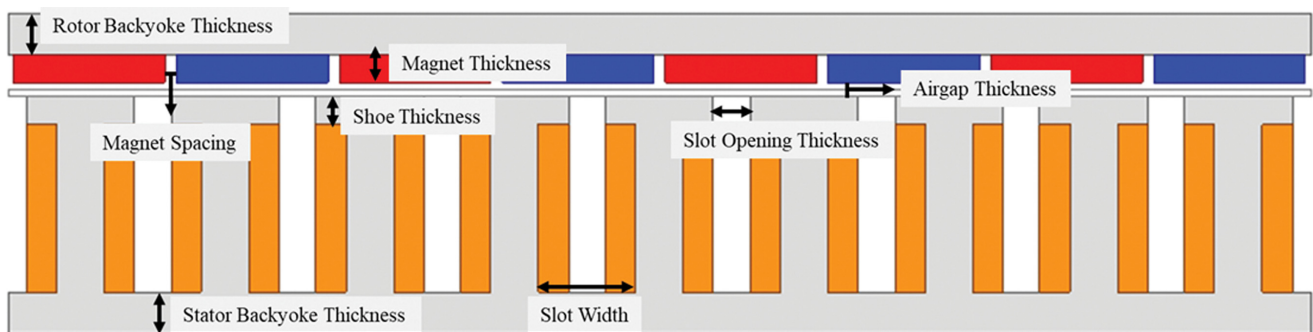


Fig. 1. (Color online) Design variables.

Table II. Design variables and ranges according to outer diameter.

Item		50φ		150φ		250φ		Unit
		min	max	min	max	min	max	
Rotor	Magnet Thickness	1	2	1.5	4.5	2.5	7.0	mm
	Magnet Spacing	0.5	0.8	0.9	2.4	1.5	4.0	
	k_rby	1.5	2.3	1.5	2.3	1.5	2.3	
Airgap Thickness		0.8	1	0.9	1.5	1.2	2.0	
Stator	Shoe Thickness	1.0	2.0	1.5	4.0	2.0	6.0	
	Slot Opening Thickness	1.5	2.5	1.8	4.5	2.5	6.5	
	Slot Width	1.5	2.35	4.5	7.55	7.5	12.75	
	k_sby	1.5	2.3	1.5	2.3	1.5	2.3	

를 나타낸다.

따라서 본 연구의 Sobol 민감도 분석 결과는 동일한 절대 설계 범위에서 외경만의 영향을 분리한 결과보다는 각 외경에서 실제 설계 가능한 범위 내에서 주요 설계 변수를 도출한 결과로 해석해야 한다. 외경별 민감도 차이는 외경 변화와 외경별 설계 가능 범위가 반영된 결과이며, 본 연구에서는 이를 바탕으로 각 외경 조건에서 우선적으로 고려해야 할 설계 변수를 비교하였다.

3. Quasi-3D 해석 신뢰성 검증

본 연구에서는 Sobol 전역 민감도 분석에 필요한 다수의 해석을 수행하기 위해 Quasi-3D 해석 기법을 적용하였다. Quasi-3D 해석은 AFPM을 반경 방향으로 분할한 뒤 각 구간에서 2D 해석을 수행하고, 반경별 해석 결과를 조합하여 전체 성능을 산출하는 방법이다. 이 방법은 3D 유한요소해석에 비해 해석 시간을 줄일 수 있으나, 3차원 누설 자속과 같은 영향을 완전히 반영하기 어렵기 때문에 해석 결과에 대한 검증이 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 대표 외경 모델에 대해 Quasi-3D 해석 결과와 3D 유한요소해석 결과를 비교하였다. 비교 지표는 본 연구의 목표 주요 출력 응답과 관련된 역기전력과 평균 토크로 설정하였다. Table III은 Quasi-3D 해석 결과와 3D 유한요소해석 결과를 나타낸다. 비교 결과 Quasi-3D 해석은 역기전력 및 평균 토크에서 유사한 결과를 보였고, 성능

변화 경향도 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Quasi-3D 해석 결과를 외경별 설계 변수 영향도 비교를 위한 출력 응답으로 사용하였다.

4. DOE 및 Sobol Index 산출

Sobol sequence는 설계 공간 내 샘플을 비교적 균일하게 배치할 수 있는 저불일치 준무작위 수열이다. 따라서 다수의 입력 변수를 갖는 전역 민감도 분석에서 특정 영역에 샘플이 집중되거나 공백이 발생하는 문제를 줄이고, 제한된 해석 횟수로 설계 공간을 효율적으로 탐색할 수 있다. 본 연구에서 고려한 설계 변수는 총 8개이며, Sobol sequence의 균형성을 확보하기 위해 샘플 수를 $2^8 = 256$ 개로 설정하였다[14]. 본 논문의 목적은 각 외경 조건에서 최적해를 직접 도출하는 것이 아닌, 토크, 토크리플, 토크밀도 및 전압 THD에 대한 주요 설계 변수를 선별하는 것이다. 따라서 해석 시간과 탐색성을 함께 고려하여 256개의 실험계획법 조건을 적용하였다.

각 DOE 조건에 대해 Quasi-3D 해석을 수행하였으며, 해석 결과로 토크, 토크리플, 토크밀도 및 전압 THD를 산출하였다. 이후 256개의 해석 결과를 이용하여 각 외경 및 성능 지표별 surrogate model을 구성하였다. Surrogate model의 입력 변수는 자석 두께, 자석 간격, 회전자 백요크 두께, 공극 두께, 슈 두께, 고정자 백요크 두께, 슬롯 오프닝 두께 및 슬롯 너비의 총 8개의 형상 변수로 설정하였고, 출력 응답은 토크, 토크리플, 토크밀도 및 전압 THD로 설정하였다.

본 연구에서는 입력 변수와 출력 응답 사이의 비선형 관계를 확률적으로 근사할 수 있는 회귀 모델인 Gaussian process Regression(GPR) 기반 대리모델(surrogate model)을 사용하였다. 또한, 입력 변수의 크기 차이에 따른 영향을 줄이기 위해 입력 데이터를 표준화한 후 GPR 모델을 학습하였다. 각 성능 지표별로 독립적인 GPR surrogate model을 구성하였으며, 학습된 모델을 이용하여 Sobol index를 산출하였다. 예측된 출력 응답을 이용하여 first-order Sobol index와 total Sobol index를 계산하였다. First-order Sobol index는

Table III. Comparison between 3D FEA and Quasi-3D analysis results.

Outer Diameter	Method	Phase Voltage	Torque
50 mm	3D FEA	4.21	0.18
	Quasi-3D	3.73	0.17
100 mm	3D FEA	20.4	0.87
	Quasi-3D	19.2	0.873
150 mm	3D FEA	37.3	1.52
	Quasi-3D	36.6	1.66

Table IV. Prediction accuracy of surrogate models.

Outer Diameter	Torque	Torque Ripple	Torque Density	Voltage THD
50 mm	0.99	0.85	1.0	0.78
150 mm	0.96	0.89	0.99	0.77
250 mm	0.99	0.89	0.98	0.88

개별 설계 변수가 출력 응답에 미치는 독립적인 영향을 의미하고, total Sobol index는 해당 변수가 다른 변수와의 상호 작용을 포함하여 출력 응답에 미치는 전체 영향을 의미한다.

Surrogate model의 예측 정확도는 교차검증 결정계수 $CV-R^2$ 를 이용하여 평가하였다. 본 연구에서는 $CV-R^2 \geq 0.90$ 인 경우 예측 정확도가 높은 것으로 판단하였고, $0.80 \leq CV-R^2 < 0.90$ 인 경우 민감도 분석에 사용 가능한 수준으로 보았다. 또한 $0.70 \leq CV-R^2 < 0.80$ 인 경우에는 결과 해석에 주의가 필요한 것으로 판단하였으며, $CV-R^2 < 0.70$ 인 경우 surrogate model의 예측 정확도가 낮아 정량적 해석에 한계가 있는 것으로 판단하였다.

Table IV는 외경별 GPR 기반 surrogate model의 $CV-R^2$ 을 나타낸다. 토크와 토크밀도는 모든 외경에서 0.99 이상으로 높은 예측 정확도를 나타냈다. 반면 토크리플과 전압 THD는 상대적으로 낮은 정확도를 보였으며, 이는 두 성능 지표가 공극 자속 분포, 슬롯 형상 및 고조파 성분배에 의해 비선형적으로 변화하기 때문으로 판단된다.

IV. 단일 성능 지표에 따른 주요 설계 변수 분석

본 장에서는 3장에서 구성한 DOE 및 GPR 기반 surrogate model을 이용하여 토크, 토크리플, 토크밀도, 전압 THD를 각

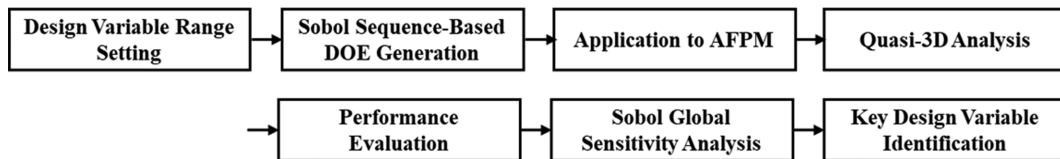
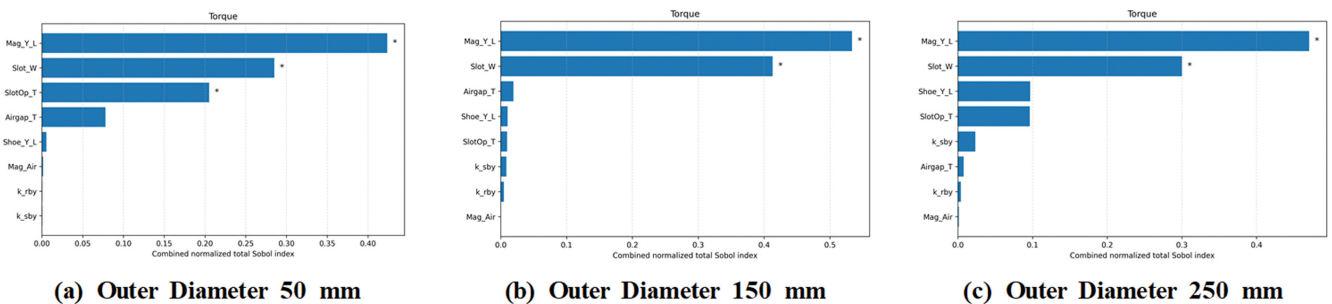
각 독립적인 성능 지표로 설정하고 Sobol 전역 민감도 분석을 수행하였다. 각 성능 지표에 대한 total Sobol index를 계산하였으며, total Sobol index가 큰 설계변수를 해당 성능 지표에 대한 주요 설계 변수로 판단하였다. Fig. 2는 본 연구에서 적용한 Sobol sequence 기반 DOE 및 민감도 분석 프로세스를 나타낸다.

1. 토크에 대한 민감도 분석

Fig. 3은 외경 50 mm, 150 mm, 250 mm 모델에서 토크에 대한 설계 변수 별 total Sobol index를 나타낸다. 분석 결과, 세 외경 모두에서 자석 두께와 슬롯 너비가 토크에 큰 영향을 미치는 주요 변수로 나타났다.

외경 50 mm 모델에서는 자석 두께, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께 순으로 높은 민감도를 보였다. 특히 자석 두께의 영향도가 가장 크게 나타났으며, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께도 토크 변화에 비교적 큰 영향을 보였다. 반면 공극 두께 이하의 변수들은 상대적으로 낮은 민감도를 보였다.

외경 150 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비의 영향도가 대부분을 차지하였다. 이때 슬롯오프닝 두께, 공극 두께, 슈 두께 등의 변수는 50 mm 모델에 비해 영향도가 감소하였다. 이는 중간 외경 조건에서 토크가 자석 축방향 길이와 슬롯 너비에 의해 결정됨을 의미한다.

**Fig. 2.** Sobol sequence-based sensitivity analysis process.**Fig. 3.** (Color online) Sobol sensitivity indices for torque according to outer diameter.

외경 250 mm 모델에서도 자석 두께와 슬롯 너비가 주요 변수로 나타났다. 다만 150 mm 모델과 비교하면 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 영향도가 일부 증가하였다. 그러나 전체적으로 토크에 대해서는 세 외경 모두 자석 두께와 슬롯 너비가 공통적인 주요 변수로 판단된다.

따라서 토크를 목표 성능 지표로 설정할 경우, 외경과 관계없이 자석 두께와 슬롯 너비를 우선적으로 고려해야 한다. 특히 50 mm 모델에서는 슬롯오프닝 두께의 영향도도 함께 고려할 필요가 있고, 250 mm 모델에서는 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 영향이 보조적으로 나타난다.

2. 토크리플에 대한 민감도 분석

Fig. 4는 외경별 토크리플에 대한 total Sobol index를 나타낸다. 토크리플의 경우 토크와 달리 외경에 따라 주요 설계 변수가 뚜렷하게 변화하였다.

외경 50 mm 모델에서는 슬롯 너비, 자석 두께, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께가 주요 변수로 나타났다. 이중 슬롯 너비의 민감도가 가장 높았으며, 자석 두께와 슬롯오프닝 두께도 토크리플 변화에 큰 영향을 미쳤다. 이는 소형 외경 조건에서 슬롯 너비와 자석 두께, 슬롯오프닝 두께가 토크 변동에 민감하게 작용함을 의미한다.

외경 150 mm 모델에서는 슬롯오프닝 두께, 공극 두께, 슬롯 너비, 슈 두께가 높은 민감도를 보였다. 특히 슬롯오프닝 두께와 공극 두께가 가장 큰 영향을 미쳤으며, 50 mm 모델

에서 주요했던 자석 두께의 영향도는 상대적으로 감소하였다. 즉, 150 mm 조건에서는 슬롯 오프닝 두께와 공극 두께가 토크리플에 더 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

외경 250 mm 모델에서는 슬롯오프닝 두께, 슈 두께, 공극 두께가 주요 변수로 도출되었다. 특히 슬롯오프닝 두께의 민감도가 가장 높았으며, 슈 두께와 공극 두께도 큰 영향을 보였다. 반면 슬롯 너비와 자석 두께의 영향도는 50 mm 모델에 비해 감소하였다.

따라서 토크리플 저감을 목표로 할 경우, 외경에 따라 우선적으로 조정해야 하는 변수가 달라진다. 50 mm 모델에서는 슬롯 너비와 자석 두께를 중심으로 검토해야 하며, 150 mm와 250 mm 모델에서는 슬롯오프닝 두께와 공극 두께, 슈 두께의 영향을 중점적으로 고려할 필요가 있다.

3. 토크밀도에 대한 민감도 분석

Fig. 5는 외경별 토크밀도에 대한 total Sobol index를 나타낸다. 토크밀도는 토크와 체적이 함께 반영되는 지표이므로, 토크에 대한 민감도와 유사한 경향을 보이지만, 외경에 따라 주요 변수의 상대적 영향도는 다르게 나타났다.

외경 50 mm 모델에서는 슬롯 너비와 슬롯오프닝 두께가 토크밀도에 가장 큰 영향을 미쳤다. 특히 슬롯 너비의 민감도가 가장 높았고, 슬롯오프닝 두께도 유사하게 큰 영향을 나타냈다. 반면 자석 두께, 공극 두께, 슈 두께 등의 변수는 상대적으로 낮은 민감도를 보였다. 이는 소형 외경 조건에서 토

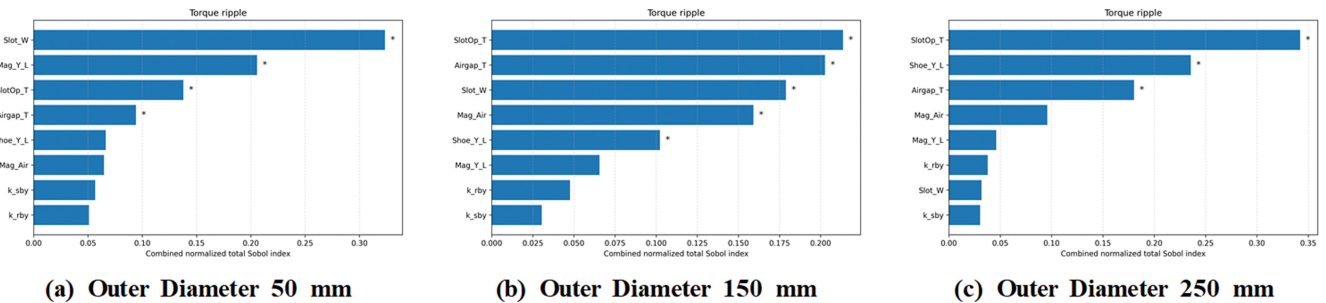


Fig. 4. (Color online) Sobol sensitivity indices for torque ripple according to outer diameter.

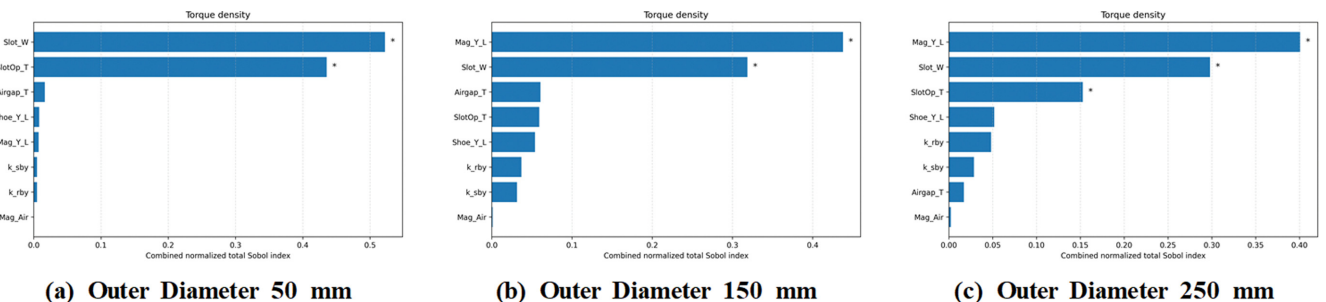


Fig. 5. (Color online) Sobol sensitivity indices for torque density according to outer diameter.

크밀도가 슬롯 형상 변수에 크게 달라짐을 의미한다.

외경 150 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 주요 변수로 나타났다. 자석 두께의 영향도가 가장 높았으며, 슬롯 너비가 다음으로 높은 민감도를 보였다. 공극 두께, 슬롯오프닝 두께, 슈 두께는 일정한 영향은 있으나, 두 주요 변수에 비해 상대적으로 낮았다.

외경 250 mm 모델에서도 자석 두께와 슬롯 너비가 높은 민감도를 보였고, 슬롯오프닝 두께가 그 다음으로 나타났다. 특히 자석 두께의 영향도가 가장 크게 나타나, 대형 외경 조건에서는 자석 축방향 길이가 토크밀도 변화에 중요한 변수로 작용함을 확인할 수 있다.

따라서 토크밀도를 목표 성능 지표로 설정할 경우, 50 mm 모델에서는 슬롯 너비와 슬롯오프닝 두께를 우선적으로 고려해야 한다. 반면 150 mm와 250 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 주요 변수로 도출되므로, 외경 증가에 따라 토크밀도에 대한 자석 두께의 영향이 커지는 것을 확인할 수 있다.

4. 전압 THD에 대한 민감도 분석

전압 THD는 전압 파형의 고조파 왜곡 정도를 나타내는 지표로, 전동기의 성능 특성, 진동 및 소음, 제어 특성과 관련된다. Fig. 6은 외경 50 mm, 150 mm, 250 mm 모델에서 전압 THD에 대한 total Sobol index를 나타낸다. 전압 THD는 공극 자속 분포와 고조파 성분에 영향을 받는 지표로, 외경 변화에 따라 주요 설계 변수가 크게 달라졌다.

외경 50 mm 모델에서는 슬롯 너비, 자석 두께, 공극 두께가 주요 변수로 나타났다. 슬롯 너비가 가장 높은 민감도를 보였고, 자석 두께와 공극 두께도 유사한 수준의 영향도를 나타냈다. 반면 슬롯오프닝 두께 이하의 변수들은 상대적으로 낮은 민감도를 보였다.

외경 150 mm 모델에서는 슈 두께, 자석 두께, 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 나타났다. 특히 슈 두께의 민감도가 가장 크게 나타났으며, 이는 중간 외경 조건에서 슈 두께가 전압 THD에 지배적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. 자석

두께와 슬롯오프닝 두께 역시 고조파 성분과 관련된 주요 변수로 판단된다.

외경 250 mm 모델에서도 슈 두께가 가장 큰 민감도를 보였으며, 슬롯오프닝 두께가 두 번째 주요 변수로 나타났다. 자석 두께는 150 mm 모델에 비해 영향도가 감소하였고, 나머지 변수들의 민감도는 상대적으로 낮았다.

따라서 전압 THD를 저감하기 위한 설계에서는 외경 별로 주요 변수를 다르게 고려해야 한다. 50 mm에서는 슬롯 너비, 자석 두께, 공극 두께가 중요하고, 150 mm와 250 mm에서는 슈 두께와 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 나타났다. 특히 외경이 증가할수록 전압 THD에 대한 슈 두께의 영향이 커지는 경향을 확인할 수 있다. 다만, 전압 THD는 고조파 성분을 기반으로 산출되는 지표이므로, 토크나 토크밀도에 비해 비선형성이 크게 나타날 수 있다. 이에 따라 surrogate model의 예측 정확도가 상대적으로 낮아질 수 있으며, Sobol index의 해석에는 정확도 검증 결과를 함께 고려하여 해석하여야 한다.

5. 단일 성능 지표 별 주요 설계 변수 비교

Table V는 외경별 단일 성능 지표에 대한 주요 설계 변수를 나타낸다. 분석 결과, 토크는 세 외경 모두에서 자석 두께와 슬롯 너비가 공통적으로 높은 민감도를 보였고, 토크밀도 역시 150 mm와 250 mm에서는 동일한 경향을 나타냈다. 반면 50 mm의 토크밀도는 슬롯 너비와 슬롯오프닝 두께가 지배적으로 나타나, 소형 외경 조건에서는 슬롯 형상 변수의 영향이 크게 나타났다.

토크리플과 전압 THD는 외경 변화에 따른 주요 변수 변화가 뚜렷하였다. 토크리플은 50 mm에서는 슬롯 너비와 자석 두께의 영향이 컸으나, 150 mm와 250 mm에서는 슬롯오프닝 두께, 공극 두께, 슈 두께의 영향이 증가하였다. 전압 THD는 50 mm에서는 슬롯 너비, 자석 두께, 공극 두께가 주요 변수였으나, 150 mm와 250 mm에서는 슈 두께와 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 나타났다.

이를 통해 동일한 종류의 설계 변수를 적용하더라도, 외경

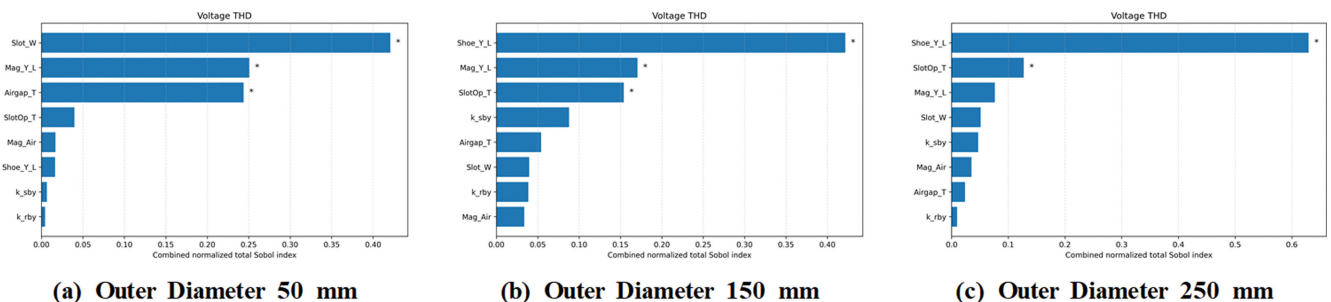


Fig. 6. (Color online) Sobol sensitivity indices for voltage THD according to outer diameter.

Table V. Dominant design variables for each single performance index.

Outer Diameter	Torque	Torque Ripple	Torque Density	Voltage THD
50 mm	Mag_T Slot_W SlotOp_T	Slot_W Mag_T SlotOp_T Airgap_T	Slot_W SlotOp_T	Slot_W Mag_T Airgap_T
150 mm	Mag_T Slot_W	SlotOp_T Airgap_T Slot_W Mag_Spacing Shoe_T	Mag_T Slot_W	Shoe_T Mag_T SlotOp_T
250 mm	Mag_T Slot_W	SlotOp_T Shoe_T Airgap_T	Mag_T Slot_W SlotOp_T	Shoe_T SlotOp_T

별 설계 가능 범위와 성능 지표에 따라 주요 설계 변수가 다르게 나타남을 확인하였다. 따라서 AFPM 최적설계에서는 모든 설계 변수를 동일한 비중으로 고려하기보다, 외경과 목표 성능 지표에 따라 민감도가 높은 변수를 우선적으로 선정할 필요가 있다.

V. 복수 성능 지표 조합에 따른 주요 설계 변수 분석

4장에서는 토크, 토크리플, 토크밀도, 전압 THD를 각각 독립적인 성능 지표로 두고 외경별 민감도 분석을 수행하였다. 그러나 실제 전동기 설계에서는 하나의 성능 지표만을 고려하는 것이 아니라, 여러 성능 지표를 동시에 만족해야 한다. 따라서 본 장에서는 복수의 성능 지표를 동시에 고려하는 경우에 대해 주요 설계 변수를 분석하였다.

복수 성능 지표를 동시에 고려할 경우, 각 성능 지표별 Sobol index만으로는 설계 변수의 중요도를 판단하기 어렵다. 특히, 각 성능 지표별 민감도 결과를 동일한 기준에서 비교하기 위해 정규화 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 성능 지표에 대한 total Sobol index를 해당 성능 지표의 total Sobol index 합으로 나누어 정규화하였다. 이후 복수 성능 지표 조합에 포함된 각 성능 지표의 정규화된 total Sobol index를 평균화하여 조합 민감도 점수로 사용하였다. 본 연구에서는 특정 성능 지표에 우선순위를 부여하지 않고, 외경별 설계 변수 영향도의 일반적인 변화를 비교하는 것을 목적으로 하였으므로 모든 성능 지표에 동일한 가중치를 적용하였다. 따라서 두 개, 세 개, 네 개 성능 지표 조합 모두에서 조합에 포함된 성능 지표들은 동일한 비중으로 반영되었다.

조합 민감도 점수가 큰 변수는 해당 성능 지표 조합에서 영향이 큰 설계 변수로 판단하였다. 본 연구에서는 조합 민

감도 점수가 0.10 이상이거나, 누적 기여도 80% 이내에 포함되는 변수를 주요 설계 변수로 선정하였다.

1. 두 개 성능 지표 조합에 따른 주요 설계 변수

두 개 성능 지표 조합은 아래와 같은 총 6가지로 구성하였다. (T , T_d), (T , T_r), (T , THD), (T_d , T_r), (T_d , THD), (T_r , THD) 여기서 T 는 토크, T_r 은 토크리플, T_d 는 토크밀도, THD 는 전압 THD를 의미한다.

50 mm 모델에서는 대부분의 두 개 성능 지표 조합에서 슬롯 너비, 자석 두께, 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 나타났다. 특히 토크와 토크밀도를 동시에 고려한 경우 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께, 자석 두께 순으로 높은 조합 민감도 점수를 보였으며, 토크와 토크리플을 동시에 고려한 경우에는 자석 두께, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 도출되었다. 또한 전압 THD가 포함되는 조합에서는 공극 두께의 영향이 함께 증가하였다. 이는 50 mm 모델에서 복수 성능 지표를 동시에 고려할 경우 슬롯 너비와 자석 두께, 슬롯오프닝 두께가 가장 반복적으로 영향을 미치는 변수임을 의미한다.

150 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 대부분의 조합에서 주요 변수로 나타났다. 토크와 토크밀도 조합에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 지배적인 영향을 보였고, 토크와 토크리플 조합에서는 자석 두께, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께가 주요 변수로 도출되었다. 전압 THD가 포함되는 조합에서는 슈 두께의 영향이 증가하였다. 특히 토크밀도와 전압 THD 조합, 토크리플과 전압 THD 조합에서는 슈 두께가 높은 조합 민감도 점수를 나타내어, 150 mm 조건에서는 전압 THD를 함께 고려할 때 슈 두께의 영향을 검토해야함을 알 수 있다.

250 mm 모델에서는 조합에 따라 주요 변수가 더욱 뚜렷하게 구분되었다. 토크와 토크밀도 조합에서는 자석 두께, 슬

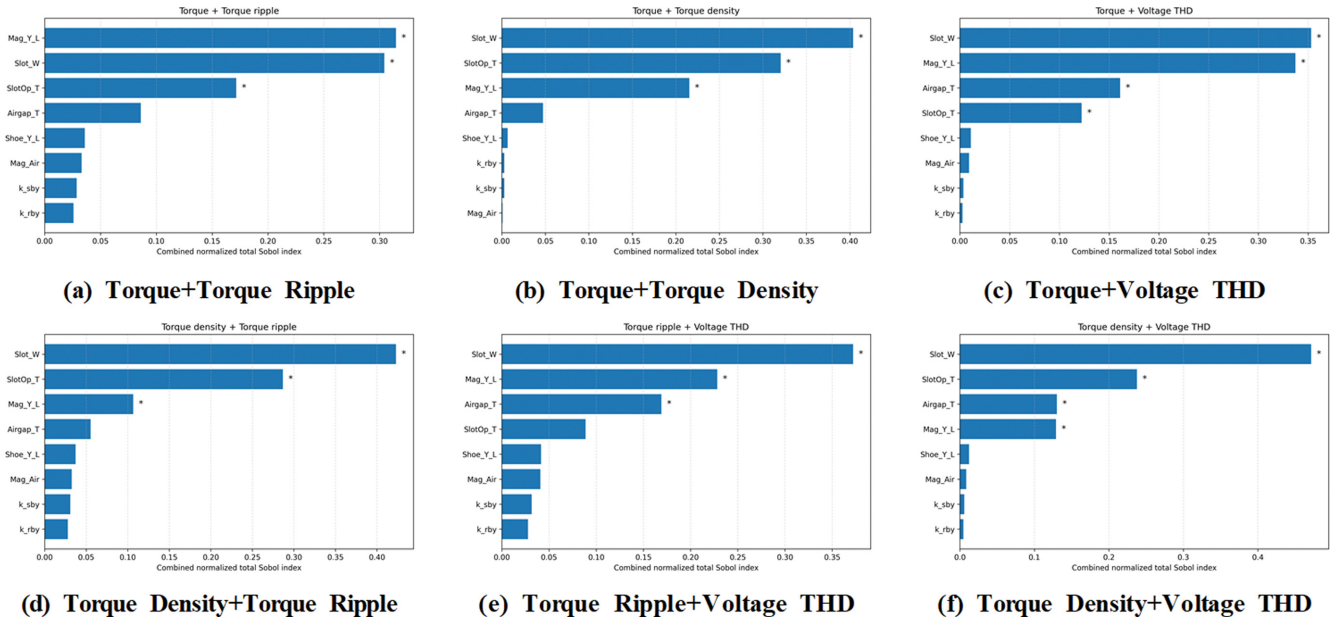


Fig. 7. (Color online) Combined sensitivity scores for two performance-index combinations at 50 mm outer diameter.

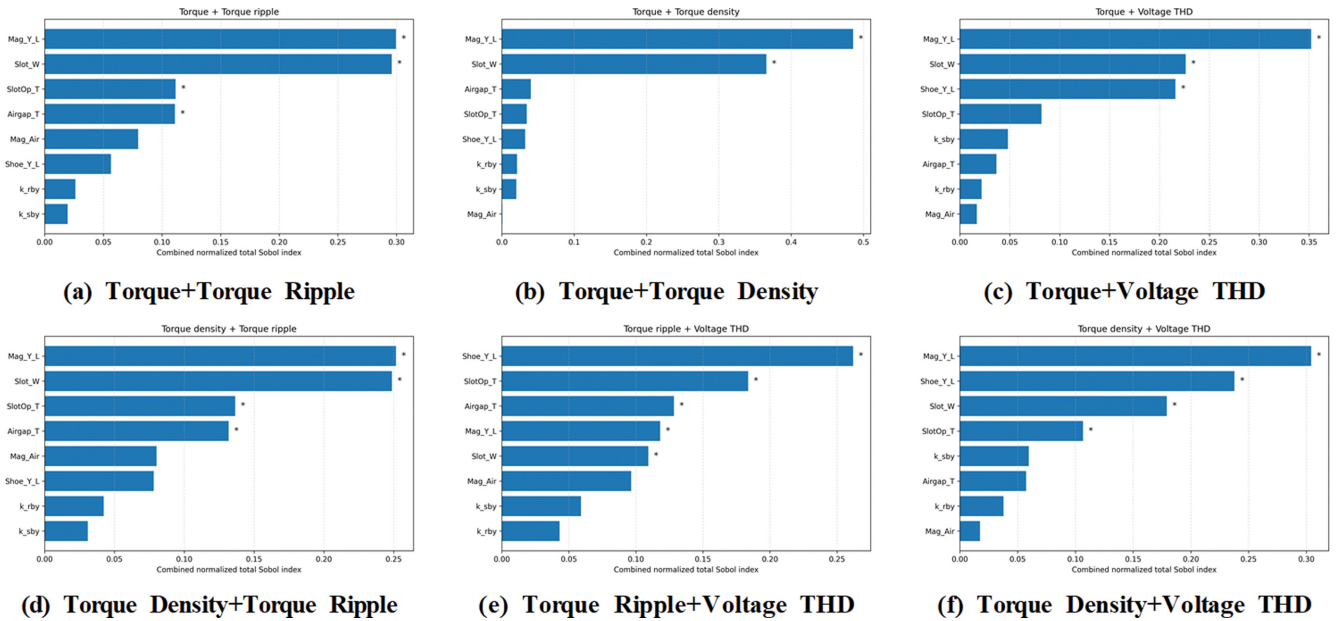


Fig. 8. (Color online) Combined sensitivity scores for two performance-index combinations at 150 mm outer diameter.

롯 너비, 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 나타났으며, 토크와 토크리플 조합에서는 자석 두께, 슬롯오프닝 두께, 슈 두께, 슬롯 너비가 주요 변수로 도출되었다. 또한 전압 THD가 포함되는 조합에서는 슈 두께가 가장 높은 민감도를 보이는 경우가 많았다. 특히 토크와 전압 THD, 토크밀도와 전압 THD, 토크리플과 전압 THD 조합에서는 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 영향이 크게 나타났다. 이는 대형 외경 조건에서 고조파 및 토크 변동 특성을 함께 고려할 경우 슈 두께와 슬롯오프닝 두께가 중요한 설계 변수로 작용함을 의미한다.

따라서 두 개 성능 지표 조합 분석 결과, 50 mm에서는 슬롯 너비, 자석 두께, 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 반복적으로 나타났고, 150 mm에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 지배적인 영향을 보였다. 반면 250 mm에서는 전압 THD나 토크리플이 포함되는 조합에서 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 영향이 크게 증가하였다.

2. 세 개 성능 지표 조합에 따른 주요 설계 변수

세 개 성능 지표 조합은 (T, T_r, T_d) , (T, T_r, THD) , $(T,$

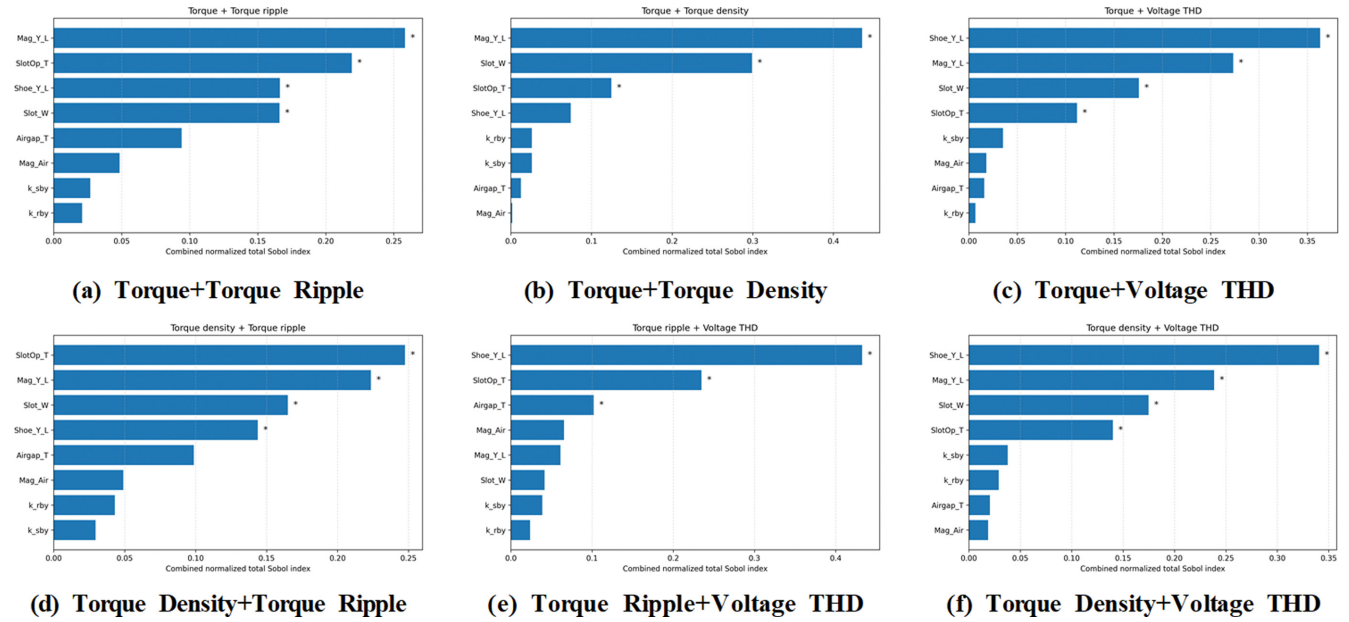


Fig. 9. (Color online) Combined sensitivity scores for two performance-index combinations at 250 mm outer diameter.

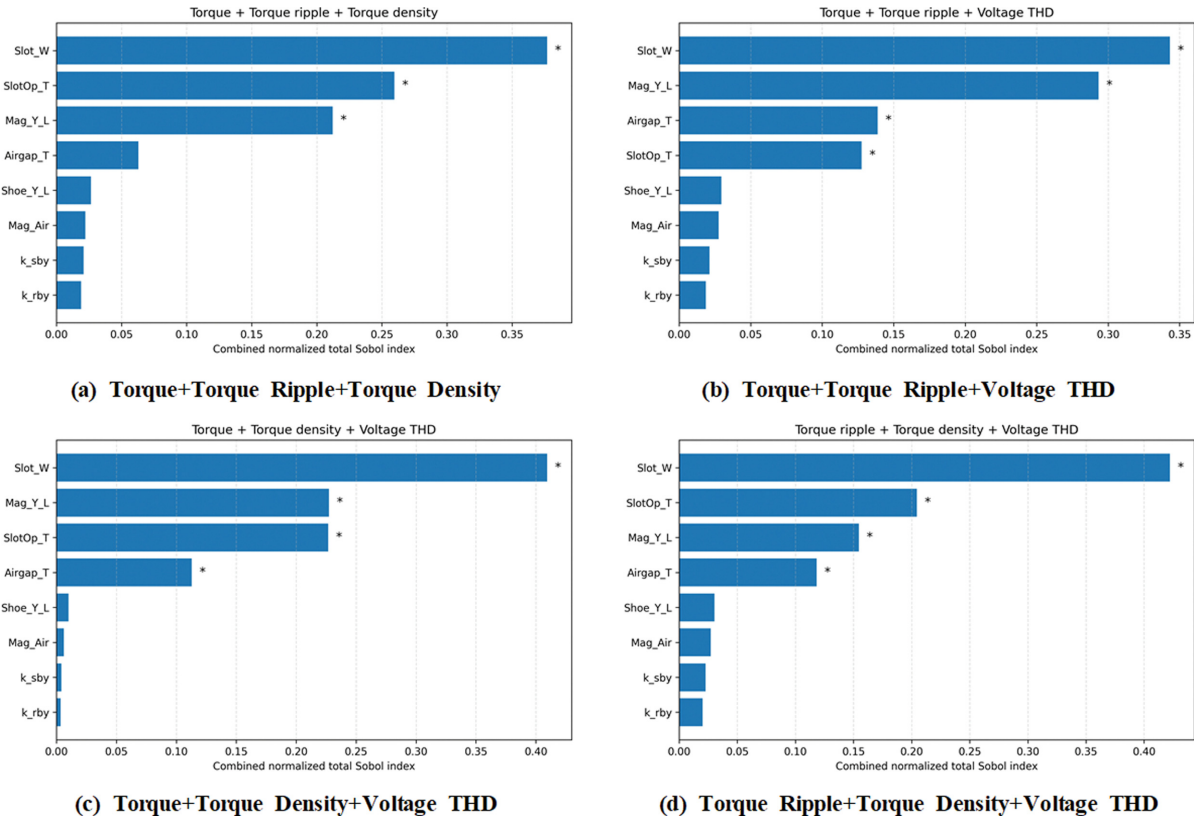


Fig. 10. (Color online) Combined sensitivity scores for three performance-index combinations at 50 mm outer diameter.

T_d , THD), (T_r, T_d, THD) 의 총 4가지로 구성하였다.

50 mm 모델에서는 세 개 성능 지표 조합에서도 슬롯 너비, 자석 두께, 슬롯오프닝 두께가 반복적으로 주요 변수로 나타났다. 토크, 토크리플, 토크밀도를 동시에 고려한 경우에는 슬

롯 너비, 슬롯오프닝 두께, 자석 두께가 주요 변수로 도출되었고, 전압 THD가 포함되는 조합에서는 공극의 영향이 추가적으로 증가하였다. 네 가지 단일 지표 중 전압 THD가 포함될 경우 공극 두께가 주요 변수에 포함되는 경향이 나타났으

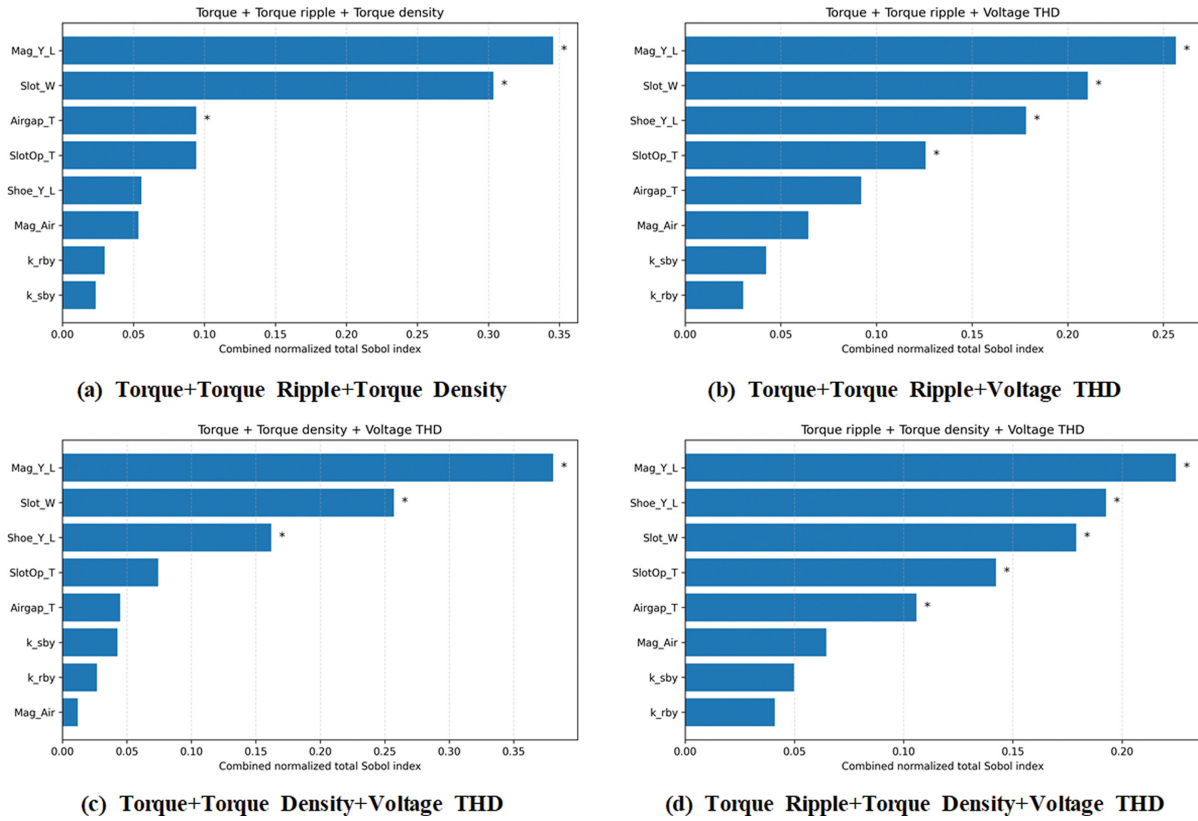


Fig. 11. (Color online) Combined sensitivity scores for three performance-index combinations at 150 mm outer diameter.

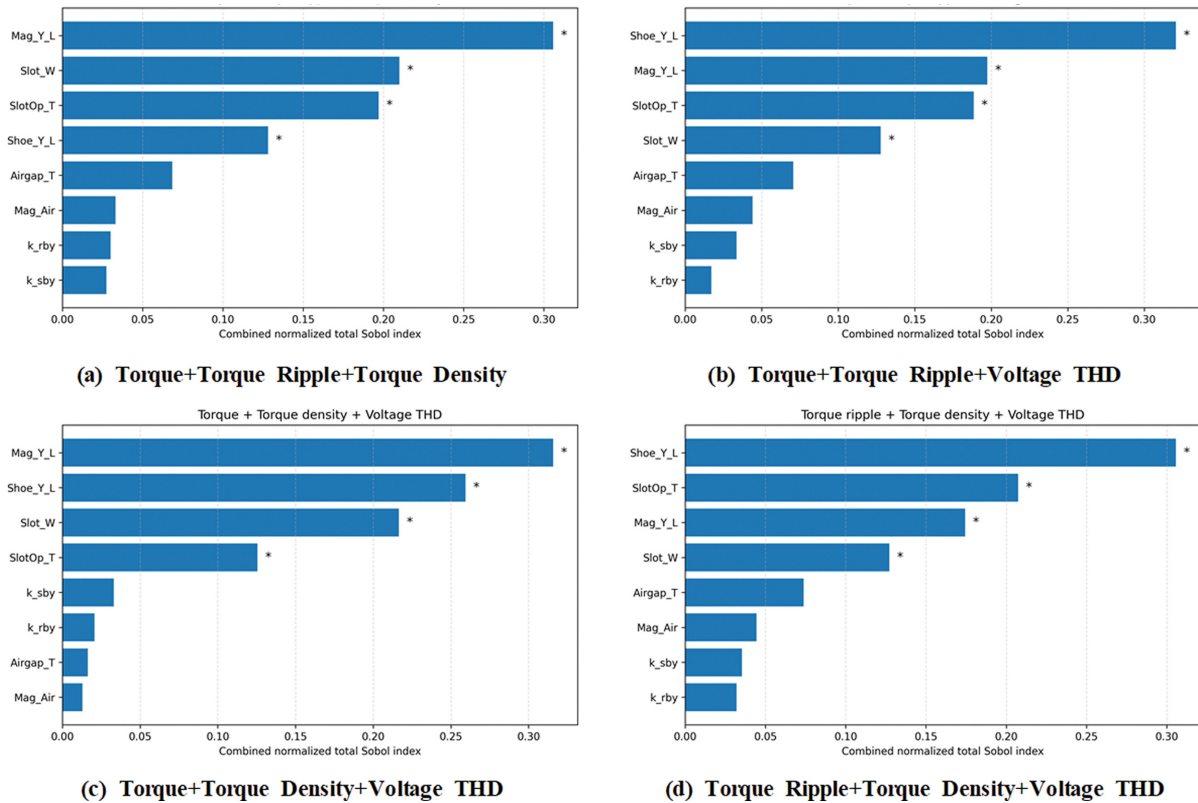


Fig. 12. (Color online) Combined sensitivity scores for three performance-index combinations at 250 mm outer diameter.

므로, 50 mm 모델에서는 공극 두께를 함께 검토해야한다.

150 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 세 개 성능 지표 조합에서도 반복적으로 높은 민감도를 보였다. 토크, 토크리플, 토크밀도 조합에서는 자석 두께, 슬롯 너비, 공극 두께, 슬롯오프닝 두께가 주요 변수로 나타났으며, 전압 THD가 포함되는 경우 슈 두께의 영향이 증가하였다. 특히, 토크리플, 토크밀도, 전압 THD 조합에서는 자석 두께, 슈 두께, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께가 주요 변수로 도출되어, 복수의 성능 지표를 동시에 고려할수록 자석 두께 뿐만 아니라 슈 두께, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께의 영향도 함께 고려해야 한다.

250 mm 모델에서는 세 개 성능 지표 조합에서 자석 두께, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께, 슈 두께가 주요 변수로 반복적으로 나타났다. 토크, 토크리플, 토크밀도 조합에서는 자석 두께, 슬롯 너비, 슬롯오프닝 두께, 슈 두께가 주요 변수로 도출되었다. 반면 전압 THD가 포함되는 조합에서는 슈 두께의 민감도가 크게 증가하였다. 특히 토크리플, 토크밀도, 전압 THD 조합에서는 슈 두께, 슬롯오프닝 두께, 자석 두께, 슬롯 너비가 주요 변수로 나타나, 대형 외경 조건에서 고조파 성분과 토크 리플을 함께 고려할 경우 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 중요도가 커짐을 확인하였다.

세 개 성능 지표 조합 분석 결과, 50 mm 모델은 슬롯 너비 중심의 경향이 강하게 나타났고, 150 mm 모델은 자석 두께와 슬롯 너비가 공통적인 주요 변수로 나타났다. 250 mm 모델은 전압 THD나 토크리플이 포함되는 조합에서 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 영향이 증가하는 경향을 보인다.

3. 네 개 성능 지표 조합에 따른 주요 설계 변수

마지막으로 (T , T_r , T_d , THD)의 네 가지 성능 지표를 모두 동시에 고려하였다.

50 mm 모델에서는 슬롯 너비, 자석 두께, 슬롯오프닝 두

께, 공극 두께가 주요 변수로 도출되었다. 이 중 슬롯 너비가 가장 높은 조합 민감도 점수를 보였고, 자석 두께와 슬롯오프닝 두께도 높은 영향도를 나타냈다. 따라서 50 mm 모델에서 전체 성능 지표를 동시에 고려할 경우, 슬롯 너비를 우선적으로 검토하고, 자석 두께와 슬롯오프닝 두께를 함께 고려하는 것이 필요하다. 또한, 전압 THD가 포함되면서 공극 두께의 영향도 주요 변수로 포함되었다.

150 mm 모델에서는 자석 두께, 슬롯 너비, 슈 두께, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께가 주요 변수로 나타났다. 이 중 자석 두께가 가장 높은 조합 민감도 점수를 보였고, 슬롯 너비가 그 다음으로 높은 영향을 보였다. 또한 전압 THD와 토크리플이 함께 고려되면서 슈 두께, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께도 주요 변수로 포함되었다. 따라서 150 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비를 우선 고려하고, THD 및 토크리플 특성을 위해 슈 두께, 슬롯오프닝 두께, 공극 두께도 함께 검토해야 한다.

250 mm 모델에서는 슈 두께, 자석 두께, 슬롯오프닝 두께, 슬롯 너비가 주요 변수로 도출되었다. 특히 슈 두께가 가장

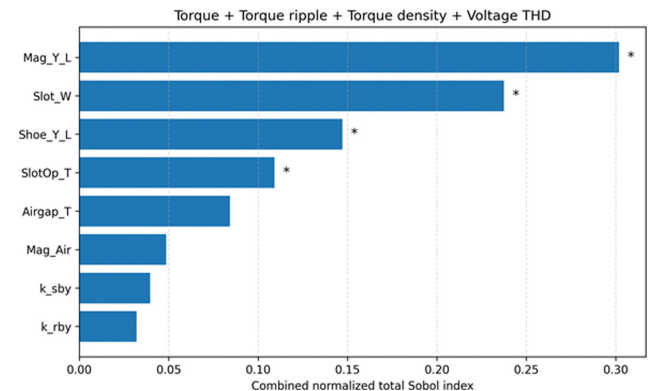


Fig. 14. (Color online) Combined sensitivity scores for all performance-index combinations at 150 mm outer diameter.

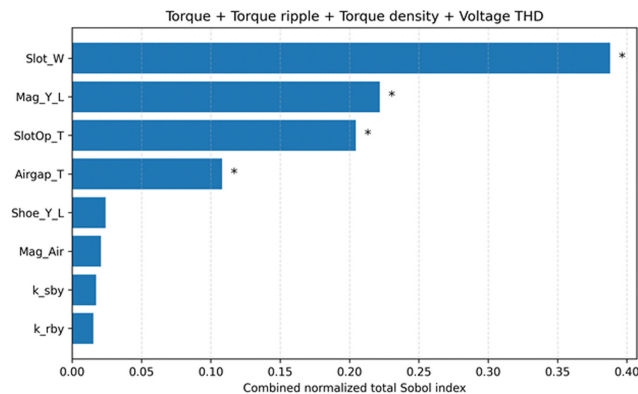


Fig. 13. (Color online) Combined sensitivity scores for all performance-index combinations at 50 mm outer diameter.

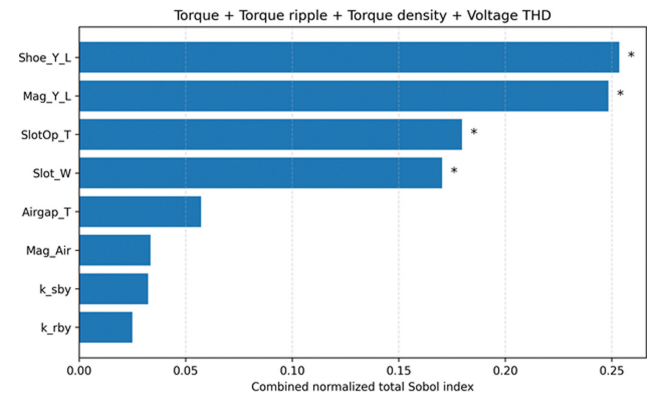


Fig. 15. (Color online) Combined sensitivity scores for all performance-index combinations at 250 mm outer diameter.

높은 조합 민감도 점수를 보여, 네 가지 성능 지표를 동시에 고려할 경우 슈 두께의 영향이 가장 크게 나타났다. 이는 대형 외경 조건에서 전압 THD 및 토크리플과 관련된 형상 변수의 중요도가 증가하기 때문이다. 또한, 자석 두께는 높은 민감도를 나타내어 토크 및 토크밀도 성능에 중요한 변수로 유지되었고, 슬롯오프닝 두께와 슬롯 너비도 전체 성능 지표를 고려할 경우 주요 변수로 도출되었다.

네 가지의 성능 지표 전체 조합 결과를 비교하면, 외경이 증가할수록 주요 변수의 중심이 슬롯 너비에서 자석 두께, 슈 두께로 이동하는 경향을 보인다. 50 mm에서는 슬롯 너비가 가장 지배적이었으나, 150 mm에서는 자석 두께가 가장 큰 영향을 보였고, 250 mm에서는 슈 두께의 영향이 가장 크게 나타났다. 따라서 전체 성능 지표를 동시에 고려하는 경우 외경에 따라 우선적으로 검토해야 할 설계 변수가 달라짐을 알 수 있다.

4. 복수 성능 지표 조합 결과 비교

복수 성능 지표 조합 결과를 종합하면, 외경에 따라 주요 설계 변수의 경향이 다르게 나타났다. 50 mm 모델에서는 대부분의 조합에서 슬롯 너비가 가장 큰 영향을 보였고, 자석 두께와 슬롯오프닝 두께가 반복적으로 주요 변수로 도출되었다. 150 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 공통적으로 높은 민감도를 보였고, 전압 THD가 포함되는 조합에서는 슈 두께의 영향이 증가하였다. 250 mm 모델에서는 토크와 토크밀도 중심의 조합에서 자석 두께와 슬롯 너비가 주요 변수로 나타났으나, 토크 리플과 전압 THD가 포함되는 조합에서는 슈 두께와 슬롯오프닝 두께의 영향이 증가하였다.

특히 네 가지 성능 지표를 모두 고려한 경우, 50 mm 모델에서는 슬롯 너비, 150 mm 모델에서는 자석 두께, 250 mm 모델에서는 슈 두께가 가장 높은 민감도를 나타냈다. 따라서 동일한 종류의 설계 변수를 적용하더라도, 외경별 설계 가능 범위와 목표 성능 지표 조합에 따라 우선적으로 고려해야 할 설계 변수가 달라짐을 확인하였다. 이는 후속 최적화 단계에서 외경별 주요 설계 변수를 선정하고 설계 공간을 축소하기 위한 기준으로 활용될 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 AFPM의 외경 변화에 따른 설계 변수 영향도를 분석하기 위해 외경 50 mm, 150 mm, 250 mm 모델을 대상으로 Sobol 전역 민감도 분석을 수행하였다. 동일한 종류의 설계 변수와 동일한 해석 조건을 적용하고, Sobol sequence 기반 DOE와 Quasi-3D 해석을 통해 토크, 토크리플, 토크밀도 및 전압 THD를 산출하였다. 토크는 모든 외경

에서 자석 두께와 슬롯 너비가 공통적으로 높은 민감도를 보였고, 토크밀도는 50 mm 모델에서 슬롯 너비와 슬롯 오프닝 두께의 영향이 크게 나타난 반면, 150 mm와 250 mm 모델에서는 자석 두께와 슬롯 너비가 주요 변수로 도출되었다. 토크리플과 전압 THD는 외경 변화에 따른 주요 변수 변화가 더 뚜렷하게 나타났으며, 외경이 증가할수록 슬롯 오프닝 두께와 슈 두께의 영향이 증가하였다. 복수 성능 지표 조합 분석에서도 외경별 차이가 확인되었으며, 네 가지 성능 지표를 모두 고려한 경우 50 mm 모델에서는 슬롯 너비, 150 mm 모델에서는 자석 두께, 250 mm 모델에서는 슈 두께가 가장 높은 조합 민감도를 나타냈다. 따라서 AFPM 최적설계에서는 동일한 종류의 설계 변수를 적용하더라도, 외경별 설계 가능 범위와 목표 성능 지표 조합에 따라 우선적으로 고려해야 할 설계 변수가 달라짐을 확인하였다. 본 연구의 민감도 분석 결과는 외경별 최적설계에서 우선적으로 고려해야 할 설계 변수를 선정하고, 후속 최적화 과정의 설계 공간을 축소하는 기준으로 활용될 수 있다.

다만 본 연구는 다수의 DOE 해석을 수행하기 위해 Quasi-3D 해석과 GPR 기반 surrogate model을 활용하였으므로, 일부 조건에서는 surrogate model의 예측 정확도에 따라 민감도 결과의 정량적 해석에 주의가 필요하다. 향후 연구에서는 본 연구에서 도출된 외경별 주요 설계 변수를 기반으로 후속 최적설계를 수행하고, 최적 설계안에 대해 3D 유한요소해석 및 실험적 검증을 통해 설계 변수 영향도와 성능 개선 효과를 확인할 예정이다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-11-013-03). 또한, 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2023-00232767).

References

- [1] J. P. Trovão, IEEE Vehicular Technology Magazine **21**, 126 (2026).
- [2] Z. Song, C. Liu, Y. Chen, and R. Huang, IEEE Transactions on Vehicular Technology **71**, 7122 (2022).
- [3] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi, IEEE Transactions on Industry Applications **38**, 1517 (2002).
- [4] W. Geng, Y. Fu, J. Wang, W. Li, and Y. Wang, IEEE Transactions on Industrial Electronics **73**, 9606 (2026).
- [5] Y. Zhou, J. Liu, Z. Chen, G. Yang, Y. He, and A. Li, IEEE

- Transactions on Industrial Electronics **72**, 734 (2025).
- [6] M. Jiménez, F. Graffeo, S. Vaschetto, C. Madariaga-Cifuentes, J. A. Tapia, A. Tenconi, and A. Cavagnino, IEEE Open Journal of Industry Applications **7**, 327 (2026).
- [7] H. Tiegna, Y. Amara, and G. Barakat, IEEE Transactions on Magnetics **50**, 817 (2014).
- [8] Y. Duan and D. M. Ionel, IEEE Transactions on Industry Applications **49**, 1268 (2013).
- [9] J. Kolb and K. Hameyer, IEEE Transactions on Energy Conversion **35**, 2210 (2020).
- [10] N. Gadiyar, J. Van Verdegheem, and E. L. Severson, IEEE Transactions on Industry Applications **59**, 3920 (2023).
- [11] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola, Global Sensitivity Analysis: The Primer, John Wiley & Sons, Chichester, UK (2008) pp. 159~169.
- [12] B. V. Stein, E. Raponi, Z. Sadeghi, N. Bouman, R. C. H. J. Van Ham, and T. Bäck, IEEE Access **10**, 103364 (2022).
- [13] Y. Wang, B. Zhai, S. Gao, Y. Guo, C. Shen, and Y. Chen, IEEE Transactions on Power Systems **40**, 1024 (2025).
- [14] M. Schrader and J. Bittle, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems **25**, 11739 (2024).