

Quasi-3D를 활용한 분포권 축방향 자속 영구자석 전동기의

특성 해석 및 다목적 최적 설계

정 성 원¹⁾·김 재 윤¹⁾·유 재 경¹⁾·정 재 우²⁾·박 수 환^{*1)}

동국대학교 기계로봇에너지공학과¹⁾·대구대학교 전자전기공학부²⁾

Characteristic Analysis and Multi-Objective Optimal Design of a Distributed Winding Axial Flux Permanent Magnet Motor Using Quasi-3D

Seong-Won Jeong¹⁾ · Jae-Yoon Kim¹⁾ · Jae-Kyung Ryu¹⁾ · Jae-Woo Jung²⁾ · Soo-Hwan Park^{*1)}

Department of Mechanical, Robotics, and Energy Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Republic of Korea¹⁾,

Department of Electronic Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Republic of Korea²⁾

Key words : AFPM(축방향 영구자석 전동기), Distributed Winding(분포권), Quasi-3D(준-3D 해석), Design Optimization(최적설계)

교신저자, E-mail: parksh@dgu.ac.kr

최근 전동기 시스템에서 경량화, 고출력 밀도, 고효율 특성을 동시에 만족시키는 구동원의 필요성이 더욱 커지고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위해 기존 방사형 자속 영구자석 전동기(RFPM)를 대체하거나 보완할 수 있는 구조로서 축방향 자속형 영구자석 전동기(AFPM)가 주목받고 있다. AFPM은 자속이 축방향으로 형성되는 구조적 특성으로 인해 짧은 end-winding, 높은 토크 밀도, 박형 설계에 유리한 장점을 가진다.

AFPM은 외경, 내경, 자석 치수, 권선 구조 등 다양한 설계 변수에 따라 성능이 복합적으로 결정되고, 토크, 효율, 손실, 중량은 서로 trade-off 관계에 있으므로 다수의 설계 변수와 복수의 성능 지표를 동시에 고려할 수 있는 체계적인 최적설계 접근이 필요하다. 그러나 AFPM의 정밀 특성 해석에 일반적으로 활용되는 3-D FEA는 높은 해석 정확도를 제공하는 반면, 계산 비용과 시간이 매우 크게 소요된다는 한계가 있다. 특히 최적설계 과정에서 반복 해석이 필수적이므로, 해석 정확도와 계산 효율을 동시에 확보할 수 있는 해석 및 설계 프로세스가 요구되며, 이에 따라 Quasi-3D 기반 특성 해석은 AFPM의 전자기적 특성을 비교적 높은 정확도로 반영하면서도 3-D FEA 대비 해석 시간을 효과적으로 절감할 수 있는 방법으로 주목받고 있다.

연구의 목적은 Single-Stator Dual-Rotor(SSDR) 구조의 축방향 자속 영구자석 전동기(AFPM)를 대상으로, Quasi-3D 기반 특성해석과 대리모델을 활용한 다목적 최적설계를 수행하여 성능이 향상된 최적 설계안을 도출하는 데 있다. 이를 위해 7개의 설계 변수를 선정하고, 3개의 목적함수를 기준으로 최적화 문제를 구성하였다. 특히 Quasi-3D 해석은 전동기를 방사방향으로 분할한 5개 평면에 대해 각각 2차원 유한요소해석(FEA)을 수행한 뒤, 각 평면에서 도출된 전자기 특성값을 합산하여 전체 전동기의 성능을 예측하는 방식으로 수행된다. 이를 통해 토크, 쇄교자속, 손실 등의 주요 해석 결과를 산출하고, 이를 바탕으로 모터 맵핑 및 특성 해석을 수행하여 속도-토크, 효율, 손실 특성 등 전체 운전 영역에서의 거동을 평가하였다.

이와 같이 도출된 특성해석 결과를 바탕으로 설계 공간 내 실험점들에 대한 데이터베이스를 구축하고 대리모델을 개발하였다. 이후 NSGA-II를 적용하여 Pareto 최적해를 탐색하였으며, 최종적으로 도출된 최적해에 대해서는 Quasi-3D 해석을 다시 수행하여 대리모델 예측값과 비교함으로써 최적화 결과의 신뢰성과 대리모델의 유효성을 검증하였다.

본 연구는 5개 평면 기반의 Quasi-3D 특성해석, 모터 맵핑, 대리모델 기반 최적화 프로세스를 통합함으로써 AFPM 설계에서 요구되는 해석 정확도와 계산 효율성 사이의 균형을 확보할 수 있는 최적설계 방법론을 제시한다는 점에서 의의가 있다.

본 연구는 교육부에서 시행 중인 이공학학술연구기반구축(R&D)(전기차 파워트레인의 데이터 주도 고장예지를 위한 고장데이터 생성 다중물리 해석모델 연구, RS-2025-25430912), 및 산업통상자원부에서 시행 중인 자동차산업 기술개발사업(평각동선 분포권 기술 적용 축방향자속 전동기 개발, RS-2025-02653793)의 지원을 받아 수행되었으며, 관계자분들께 감사드립니다.

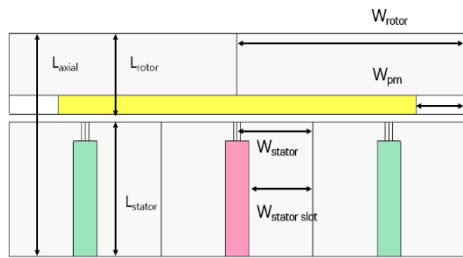


Fig. 1 Design variables for the Quasi-3D Model

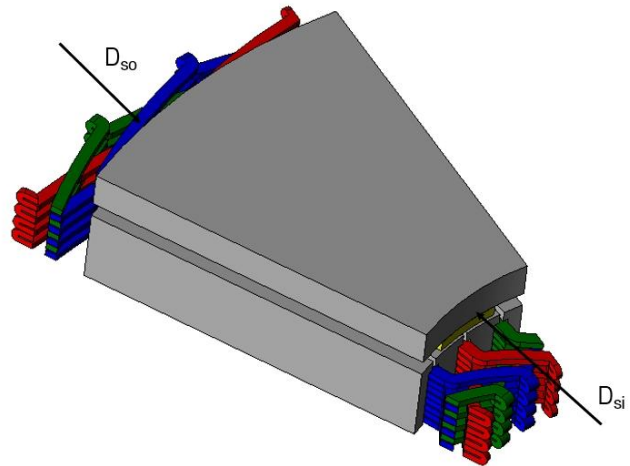


Fig.2 Design variables for the 3D Model

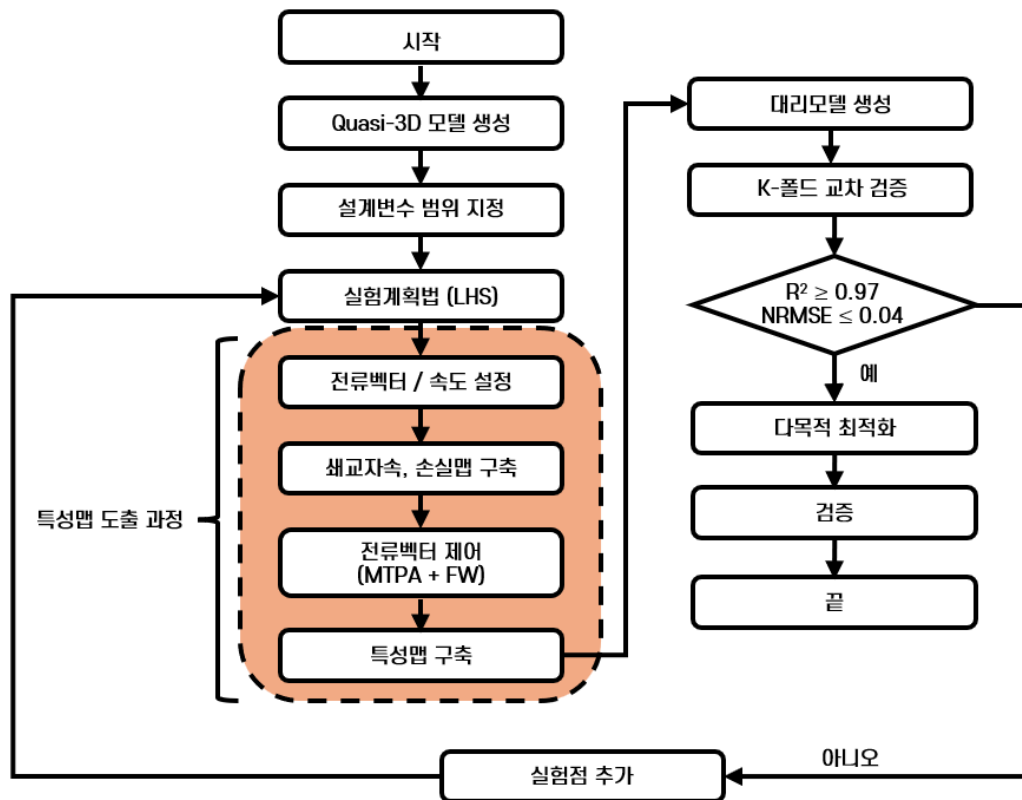


Fig. 3 Quasi-3D Based Multi-Objective Optimization Flowchart