

요 지

본 연구에서는 IPMSM(내부 영구자석 동기모터)의 고성능 설계를 위한 통합 설계 최적화 프레임워크를 제안한다. 이 프레임워크는 토크 최대화, 제조 용이성 확보, 전류 불확실성 하에서의 토크 리플 최소화를 주요 목표로 삼으며, 각기 다른 설계 과제를 해결하기 위한 세 가지 단계로 구성되어 있다.

첫 번째 단계에서는 회전자 내부의 자석 분포와 자화 방향을 동시에 최적화하기 위한 새로운 위상 최적화 기법을 제안한다. 기존 방법들이 자화 방향을 고정된 값으로 가정했던 것과 달리, 본 연구는 연속적인 자화 방향 변수를 도입하고, 이를 이산적인 목표 자화각 집합으로 투영하는 방식으로 설계를 수행한다. 이를 위해 다중 Heaviside 기반의 연속-이산 변환 투영 기법을 제안하였으며, 각 자화 방향이 가장 가까운 목표각으로 부드럽고 미분 가능한 방식으로 수렴되도록 하였다. 또한, 목표각 집합 자체를 동시에 최적화하여 성능과 제조 가능성 모두를 만족하는 자화 방향 집합을 자동으로 도출할 수 있도록 하였다. 경계 불연속성 문제를 해결하기 위한 주기 필터링 및 극좌표 경계 완화 기법도 함께 도입되었으며, 자석 블록 내 자화 방향 일관성을 평가하는 공간 지표 함수를 정의하고 이를 벌점 항에 포함시켜 제조 가능성이 높은 블록 단위 자화 패턴을 유도하였다. 제안된 방법은 벤치마크 및 산업용 사례에 적용되어 성능과 실현 가능성의 균형을 이루는 자화 구조를 성공적으로 도출하였다.

두 번째 단계에서는 위상 최적화를 통해 도출된 구조를 바탕으로, 제조 편의성을 고려한 CAD 후처리와 파라미터 기반 형상 최적화를 수행한다. 위상 최적화 결과는 최적의 자석 분포를 제공하지만, 제조가 어려운 형태를 포함할 수 있으므로, 이를 보정하기 위해 CAD 기반 형상 조정 과정을 거친 후, 성능 저하를 최소화하기 위한 파라미터 최적화를 수행한다. 이를 위해 본 연구는 확장된 Brauer 모델 기반의 등가 자기회로(EMN) 모델을 사용하여 비선형 자기 특성을 효율적으로 해석하며, 유한요소해석 대비 계산량을 획기적으로 줄이면서도 3차원 형상에 대한 정확한 분석이 가능하도록 하였다. 민감도는 유한차분법과 비교 검증된 해석적 도함수를 통해 유도되었으며, SQP(Sequential Quadratic Programming) 최적화 기법과 연계되어 빠르고 정확한 설계 갱신이 가능하도록 구현되었다. FEM 기반 설계와의 비교 실험을 통해 본 접근법이 유

사한 성능을 매우 적은 계산 시간으로 달성함을 입증하였다.

세 번째 단계에서는 인버터 전류의 불확실성에 기인한 토크 리플을 최소화하기 위한 강인 위상 최적화 프레임워크를 제안한다. 확률론적 기법이나 대규모 샘플 기반 해석에 의존하지 않고, Chebyshev 구간 근사를 활용한 비통계적 접근 방식을 도입하여 불확실성 영역 내 최악의 토크 리플을 근사하고 최소화한다. 불확실성 구간은 시스템 수준 인버터 모델을 통해 생성된 SVPWM 전류 프로파일을 기반으로 정의되며, DQ축으로 변환하여 해석 복잡도를 낮춘다. 이 문제는 미분 가능한 최소-최대 (minimax) 형태로 정식화되며, Chebyshev 포함함수(inclusion function)의 근사식을 기반으로 해석적 민감도를 유도하여 효율적인 최적화를 수행한다. 실제 구동 모터 사례를 바탕으로 다양한 인버터 스위칭 주파수 조건에서 검증을 수행하였으며, 제안된 강건 설계가 평균 토크를 유지하면서도 리플 분산을 크게 줄이는 성능을 보임으로써, 이상적인 전류 조건만을 고려한 기존 설계와의 명확한 성능 차이를 확인하였다.

본 연구에서 제안한 통합 설계 최적화 프레임워크는 빠르고 신뢰성 높은 IPMSM 설계를 가능하게 하며, 성능, 제조성, 강건성을 동시에 고려하는 실용적인 접근법을 제시한다. 위상 최적화, 해석 모델링, 민감도 기반 파라미터 최적화, 불확실성 강인 설계 등을 통합한 본 프레임워크는 기존 방식의 한계를 극복하고, 학술적 기여와 산업적 실용성을 모두 갖춘 차세대 고성능 모터 설계를 위한 유효한 솔루션임을 입증하였다.