

행렬 행렬과 쿠프만 연산자를 결합한 영구 자석 동기전동기의 데이터 기반 속도 추정 기법

조 연 식¹⁾ · 박 근 훈¹⁾ · 이 영 우^{*2)}

한양대학교 전자공학과¹⁾, 한양대학교 ERICA 전자공학부²⁾

Data-Driven Speed Estimation Method for Permanent Magnet Synchronous Motors Combining Hankel Matrix and Koopman Operator

Yeon Sik Cho¹⁾ · Keunhoon Park¹⁾ · Youngwoo Lee^{*2)}

Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, South Korea¹⁾

School of Electrical Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan 15588, South Korea²⁾

Key words : Permanent magnet synchronous motors(영구자석동기전동기), sensorless control(센서리스 제어), koopman operator(쿠프만 연산자), time-delay embedding(시간 지연 임베딩)

* 이영우, E-mail: stork@hanyang.ac.kr

본 논문은 시간 지연 좌표 임베딩(Time-delay coordinate embedding) 기반의 쿠프만 선형 상태 관측기(Koopman Linear State Observer)를 활용하여 영구자석 동기전동기(PMSM)를 위한 완전한 데이터 주도형 무센서 기법을 제안한다. 기존의 무센서 제어 기법들은 정밀한 수학적 시스템 모델과 막대한 연산 자원을 요구하는 복잡한 비선형 관측기에 주로 의존해 왔다. 이러한 한계를 극복하기 위해 제안된 기법은 특이값 분해(SVD)를 적용하여 측정 가능한 비선형 전기적 상태 변수(전압 및 전류)를 유한 차원의 쿠프만 불변 선형 부분 공간(Finite-dimensional koopman-invariant linear subspace)으로 이동(Lifting)한다. 이후, 투영된 상태 변수에 선형 회귀 모델(Linear regression model)을 적용하여 측정되지 않은 기계적 회전자 속도를 직접적으로 추정한다.

본 논문의 주요 기여점은 공간 투영과 선형 추정 과정을 단일 정적 이득 행렬(Single static gain matrix)로 통합 것에 있다. 제안된 관측기 구조는 온라인 상에서 미분 방정식을 해석할 필요성을 배제함으로써 시스템의 연산 부담을 크게 경감시키며, 표준 마이크로컨트롤러 환경에서의 실시간 구현을 용이하게 한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 제안된 데이터 기반 관측기가 시스템의 비선형성에 대한 강건성과 높은 연산 효율성을 유지하면서도 고정밀도의 속도 추정을 성공적으로 수행함을 입증한다.

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터)과 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(No. RS-2025-02214408, 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행되었습니다.