

학위논문/프로젝트 연구계획서
(Dissertation Proposal)

전동화 차량의 에너지 효율적인 토크 벡터링을 위한
모델 예측 제어
(Model Predictive Control for Energy-Efficient
Torque Vectoring in EV)

2025 년 06 월 30 일

인하대학교

소프트웨어융합대학 스마트모빌리티공학과
12214270 도준형

공과대학 기계공학과
12210262 구경원

공과대학 전기전자공학부
12210572 전동재

지도교수: 김광기

〈 요약 문(Summary)〉

연구목표 (500자내외)	본 연구의 목표는 전기차(EV)의 주행 안정성과 에너지 효율을 동시에 향상시키는 토크 벡터링 제어 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 차량 동역학 모델 기반의 상태 공간 방정식을 수립하고, 이에 기반한 모델 예측 제어(MPC)를 설계한다. 제어기 설계 시 주행 안정성뿐 아니라 에너지 소비까지 고려한 비용 함수를 도입하여 전체 시스템의 효율을 극대화한다. 최종적으로는 설계한 제어기를 임베디드 보드(Teensy 4.1)에 실장하고, 스케일카 실험을 통해 실시간 제어 가능성과 실용성을 검증하는 것이 본 연구의 궁극적 목표이다.		
연구내용 (1000자내외)	본 연구는 에너지 효율적인 토크 벡터링 제어기를 개발하고, 시뮬레이션 및 실제 하드웨어 실험을 통해 이를 검증하는 것을 주된 내용으로 한다. 먼저 차량의 횡방향 및 Yaw 운동을 반영한 차량 동역학 모델을 수립하고, 이를 선형 상태공간 형태로 정리한다. 이후 모터 토크, 속도, 전력 제한 등의 물리적 제약 조건을 반영하여 제어 시스템의 안정성과 실현 가능성을 높인다. 비용 함수에는 차량의 트래킹 오차 및 에너지 소비 항목을 동시에 반영하여 주행 성능과 효율 사이의 균형을 추구한다. 모델 예측 제어는 MATLAB 및 TinyMPC, FORCESPRO 등의 솔버를 이용하여 구현하며, 다양한 도로 및 조향 시나리오에 대해 제어 성능을 비교 분석한다. 또한 실시간 제어 성능을 확인하기 위해 Teensy 4.1 기반의 Processor-In-the-Loop(PIL) 환경을 구축하고, MPC 알고리즘을 경량화하여 실시간 제어기 형태로 이식한다. 최종적으로는 실제 스케일카에 제어기를 적용하고, 센서 기반 피드백 루프를 구성하여 실제 주행 테스트를 진행한다. 이를 통해 제어기의 실시간성, 안정성, 에너지 효율 향상 정도를 실험적으로 분석한다.		
기대효과 (500자내외) (응용분야 및 활용범위 포함)	본 연구를 통해 에너지 효율성과 주행 안정성을 모두 만족하는 전기차 토크 벡터링 제어 전략을 제시할 수 있으며, 특히 실제 임베디드 환경에서의 실시간 적용 가능성을 입증함으로써 전동화 차량 제어기 개발의 실용성을 높일 수 있다. 연구 결과는 향후 양산 전기차, 자율주행차, 모터스포츠 차량 등 다양한 분야에 적용될 수 있으며, 에너지 절감과 안전성 강화 측면에서의 기술적 파급력이 기대된다. 또한, 제어기 경량화 및 PIL 실험 기반의 개발 방법론은 다양한 제어 시스템 개발에 응용될 수 있다.		
중심어	토크 벡터링	모델 예측 제어	에너지 효율
	임베디드 제어	실시간 제어	

※ 표양식의 변경 및 삭제는 불가. 반드시 한 페이지 이내로 작성.

〈 목 차 〉

1. 연구의 필요성 -----
2. 연구의 목표 및 내용 -----
3. 연구의 추진전략 및 방법 -----
4. 선행연구의 내용 및 결과 -----
5. 연구결과의 활용방안 및 기대성과 -----
6. 인용문헌 -----
7. 기타 -----

1. 연구의 필요성

가. 국내·외 연구현황 및 기존연구의 문제점

전기차(EV)의 보급이 확대됨에 따라, 차량의 주행 성능과 안정성을 향상시키기 위한 차량 동역학 제어 연구가 전 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 특히, 각 바퀴의 구동력을 독립적으로 제어하는 토크 벡터링(Torque Vectoring) 기술은 기존 내연기관 차량의 차동장치(Differential)가 가진 한계를 극복하고, 차량의 횡방향(Lateral) 안정성과 핸들링 성능을 획기적으로 개선할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다[1][2]. 다수의 선행 연구들은 토크 벡터링과 능동 조향(Active Front Steering, AFS) 또는 후륜 조향(Rear Wheel Steering, RWS)을 통합하여, 이중 차선 변경(Double Lane Change)과 같은 극한의 주행 상황에서 차량의 요레이트(Yaw rate) 및 차체 슬립각(Slip angle) 오차를 최소화하는 데 집중해왔다. 예를 들어, 모델 예측 제어 기법을 이용한 토크벡터링과 후륜조향 통합 제어 연구에서는 모델 예측 제어(MPC)를 이용하여 토크 벡터링과 후륜 조향을 통합 제어함으로써 차량의 횡방향 안정성과 핸들링 성능을 개선하였음을 시뮬레이션으로 입증하였다[3]. 이러한 연구들은 차량의 '운동 성능(Performance)'을 극대화하는 데 큰 기여를 하였다. 그러나 이러한 성능 중심의 제어 전략은 명백한 한계를 가진다. 목표 궤적을 강인하게 추종하기 위해 듀얼모터 간에 발생하는 과도한 토크 분배는, 필연적으로 모터를 저효율 구간에서 작동시키거나 타이어의 불필요한 슬립(Slip)을 유발하여 에너지 효율의 저하로 이어질 수 있다. 전기차 산업의 가장 큰 화두가 1회 충전 주행거리(AER) 증대, 즉 '에너지 효율'임을 고려할 때, 성능과 효율 간의 상충 관계(Trade-off)를 고려하지 않은 기존 연구들은 실질적인 양산 적용에 있어 한계가 있다.

나. 연구의 필요성 및 중요성

1. 차량 동역학 모델 (Plant) 구축

제어기 검증을 위한 '가상 자동차'로 차량의 핵심적인 횡방향 및 요 운동을 표현하는 2-DOF 자전거 모델(Bicycle Model)과 선형 타이어 모델(Linear Tire Model)을 Simulink 환경에 구현한다. 본 모델은 좌/우 전륜의 독립적인 구동 토크(T_L , T_R)와 전륜 조향각(δ)을 입력받아 차량의 상태(위치, 속도, 슬립각 등)를 출력하도록 설계한다.

2. 계층적 제어 시스템(Hierarchical Control System) 설계

- 상위 제어기 (MPC): 목표 경로와 차량 상태를 바탕으로, 성능과 효율을 모두 고려하는 비용 함수를 최적화하여 '필요 요 모멘트(M_{z_req})'와 '필요 총 추진력(F_{x_req})'을 계산한다.
- 제어 할당 (Control Allocation): MPC가 결정한 목표를 만족시키면서, 총 에너지 소모($T_L^2 + T_R^2$)를 최소화하는 최적의 좌/우 모터 토크(T_L , T_R) 조합을 계산하는 최적화 알고리즘을 구현한다.

3. 시스템의 MIL(Model-in-the-Loop) 검증 및 분석

'등속 원운동'과 같은 표준 시나리오에서, MPC 비용 함수의 가중치 조절을 통해 구현된 시스템의 성능을 분석한다. 주요 평가 지표는 궤적 추종 오차(성능)와 에너지 효율이다.

2. 연구의 목표 및 내용

가. 연구의 최종목표

인휠 조향 시스템 전기차를 대상으로, 에너지 소모를 최소화하고 주행 안정성을 확보하는 MPC 기반의 제어 알고리즘을 개발하고, MATLAB/Simulink를 활용해 MIL(Model-in-the-Loop)환경에서 그 유효성을 정량적으로 검증하는 것을 최종 목표로 한다.

나. 연구의 내용

1. 차량 동역학 모델 (Plant) 구축

제어기 검증에 위한 '가상 자동차'로 차량의 핵심적인 횡방향 및 요 운동을 표현하는 자전거 모델(Bicycle Model)과 선형 타이어 모델(Linear Tire Model)을 Simulink 환경에 구현한다.

본 모델은 좌/우 전륜의 독립적인 구동 토크(T_L , T_R)와 전륜 조향각(δ)을 입력받아 차량의 상태(위치, 속도, 슬립각 등)를 출력하도록 설계한다.

2. 계층적 제어 시스템(Hierarchical Control System) 설계

- 상위 제어기 (MPC): 목표 경로와 차량 상태를 바탕으로, 성능과 효율을 모두 고려하는 비용 함수를 최적화하여 '필요 요 모멘트(M_{z_req})'와 '필요 총 추진력(F_{x_req})'을 계산한다.

- 제어 할당 (Control Allocation): MPC가 결정한 목표를 만족시키면서, 총 에너지 소모($T_L^2 + T_R^2$)를 최소화하는 최적의 좌/우 모터 토크(T_L , T_R) 조합을 계산하는 최적화 알고리즘을 구현한다.

3. 시스템의 MIL(Model-in-the-Loop) 검증 및 분석

'등속 원운동'과 같은 표준 시나리오에서, MPC 비용 함수의 가중치 조절을 통해 구현된 시스템의 성능을 분석한다. 주요 평가 지표는 궤적 추종 오차(성능)와 에너지 효율이다.

3. 연구의 추진전략 및 방법

가. 연구 추진전략 및 방법

- 문헌 연구 및 이론 학습: 차량 동역학 및 MPC 관련 핵심 이론을 학습한다.
- 모델링: MATLAB/Simulink를 이용하여 차량 플랜트 모델을 구축한다. 초기에는 선형 모델로 시작하여 시스템의 기본 골격을 완성한다.
- 제어기 설계: MPC 상위 제어기와 최적화 기반 제어 할당 로직을 설계하고 테스트 한다.
- 시스템 통합 및 MIL 검증: 모든 모듈을 통합하고 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 검증 및 분석한다.
- 문제 해결 방안: MPC 제어기의 과도한 연산 문제는 모델 단순화를 통해 해결하며, 시뮬레이션 모델과 실제 차량 간의 오차는 향후 프로젝트에서 비선형 타이어 모델 도입으로 개선할 것이다.

나. 연구 추진체계

다. 연구 추진일정

4. 선행연구의 내용 및 결과

5. 연구결과의 활용방안 및 기대성과

가. 연구개발결과의 활용방안

나. 기대성과

(1) 학문적 측면

(2) 기술적, 경제·산업적 측면

6. 인용문헌

[1] 김상혁, 김광기(2023), “에너지 효율적인 요 안정화 토크 벡터링을 위한 모델 예측 제어”

[2] Antunes, J.(2017), Torque Vectoring for a Formula Student Prototype, Master's Thesis, University of Lisbon.

[3] 차현수, 김자유, 이경수(2022), “모델 예측 제어 기법을 이용한 토크벡터링과 후륜조향 통합 제어”

[4] 김상혁, 김주현, 김광기(2021), “인 휠 모터 전기차의 에너지 최적화를 위한 예측제어 기반 토크 벡터링”

7. 기타