



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0159127
(43) 공개일자 2024년11월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B60L 15/20 (2006.01) B60L 53/00 (2019.01)
B60L 58/12 (2019.01)
(52) CPC특허분류
B60L 15/2045 (2013.01)
B60L 53/00 (2019.02)
(21) 출원번호 10-2023-0056018
(22) 출원일자 2023년04월28일
심사청구일자 2023년04월28일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 미추홀구 인하로 100(용현동, 인하대학교)
(72) 발명자
김광기
서울특별시 양천구 남부순환로 83번길 18,(신월동, 목동 센트럴 아이파크위브 2단지)207동 1502호
김선우
인천광역시 미추홀구 소성로 16 (용현동) 509호
이원형
경기도 안양시 동안구 관평로 212번길 21(관양동, 공작부영아파트)311동 805호
(74) 대리인
특허법인아이더스

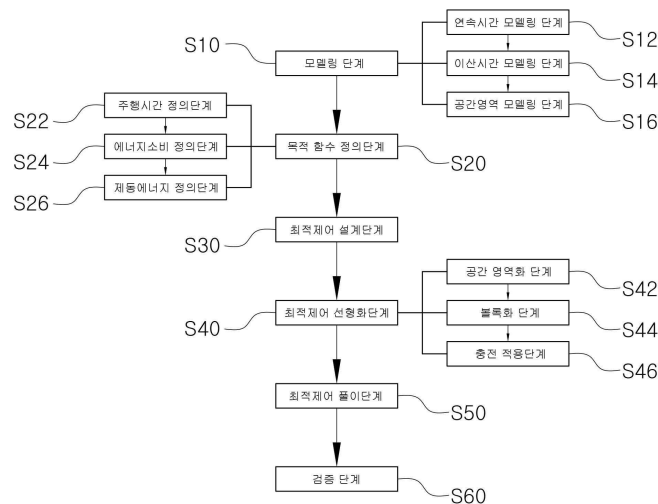
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 발명의 명칭 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법

(57) 요약

본 발명은 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 운전자의 경로 선택과 주행 시간 요구사항을 반영하여 최적화가 가능하도록 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 속도 결정과 충전소 선택 그리고 충전 시간을 계획하는 시스템 및 방법에 관한 것이다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

B60L 58/12 (2019.02)

B60L 2260/44 (2013.01)

B60L 2260/52 (2013.01)

B60L 2260/54 (2013.01)

B60Y 2200/91 (2013.01)

Y02T 10/7072 (2020.08)

Y02T 10/72 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1415188402

과제번호 P0017124

부처명 산업통상자원부

과제관리(전문)기관명 한국산업기술진흥원

연구사업명 산업혁신인재성장지원

연구과제명 신산업융합 생태계 구축을 위한 인공지능 기반 임베디드시스템 고급인력양성

기 여 율 1 / 1

과제수행기관명 (사단)한국정보산업연합회

연구기간 2023.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

컴퓨팅 장치에 의해 수행되는 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템에 있어서,

전기차의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차 속도의 동적 제어시스템을 모델링하는 모델링부;

전기차의 주행 경로가 주어진 상황에서의 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 최적제어 문제를 설계하는 최적제어 설계부;

상기 최적제어 설계부에서 설계된 최적제어 문제를 이차계획법을 사용한 블록 최적화를 통해 선형화하는 블록 최적화 변환부; 및

상기 블록최적화 변환부를 통해 선형화된 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제에 대한 최적해를 연산하는 연산부를 포함하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 모델링부는,

전기차의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차의 운동방정식을 시간에 따른 함수로 모델링 하고, 상기 모델링된 운동방정식을 Euler forward method를 이용하여 이산화하며, 상기 이산화된 운동방정식을 사다리꼴 규칙(Trapezoidal rule)을 이용하여 공간 영역에서의 운동방정식으로 변환시키는 것을 특징으로 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 블록최적화 변환부는,

최적제어 설계부에서 설계된 비선형 최적제어 문제를 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제로 변환시킨 후, 상기 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 이차계획법(Quadratic Program)을 사용한 블록 최적화(convex optimization)에 의해 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제로 변환시키는 것을 특징으로 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 블록최적화 변환부는,

공간 영역에서의 블록 최적제어 문제에 포함된 제약조건들 중 모터의 구동 효율 및 배터리 충전 속도에 대한 제약조건을 상수값으로 고정시키는 것을 특징으로 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템.

청구항 5

제 3항에 있어서,

상기 블록최적화 변환부는,

공간 영역에서의 블록 최적제어 문제의 제약조건 중 충전횟수에 대한 제약조건을 혼합정수 이차계획법(Mixed Integer Quadratic Programming)을 적용하여 설정하는 것을 특징으로 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템.

청구항 6

컴퓨팅 장치에 의해 수행되는 전기차 최적주행 및 충전계획 방법에 있어서,

전기차의 주행 경로가 선택된 상황에서의 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 비선형 모델예측제어 방법을 이차계획법을 사용한 블록 최적화에 의해 선형화하는 것을 특징으로 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 전기차 최적주행 및 충전계획 방법은,

전기차의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차 속도의 동적 제어시스템을 모델링하는 모델링 단계;

전기차의 주행 경로가 미리 선택된 상황에서의 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 위한 목적함수들을 설정하는 목적함수 정의단계;

상기 목적함수 정의단계에서 설정된 목적함수와, 제약조건을 포함하는 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 선정하는 최적제어 설계단계;

상기 최적제어 설계단계에서 선정된 비선형 최적제어 문제를 선형화하는 최적제어 선형화단계; 및

상기 최적제어 선형화단계를 통해 선형화 된 최적제어 문제에 대한 최적해를 연산하는 최적제어 풀이단계;를 포함하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법.

청구항 8

제 7항에 있어서,

상기 모델링 단계는,

전기차의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차의 운동방정식을 시간에 따른 함수로 모델링하는 연속시간 모델링 단계;

상기 연속시간 모델링 단계에서 모델링된 운동방정식을 Euler forward method를 이용하여 이산화하는 이산시간 모델링 단계; 및

이산화된 운동방정식을 사다리꼴 규칙(Trapezoidal rule)을 이용하여 공간 영역에서의 운동방정식으로 변환시키는 공간영역 모델링 단계;를 포함하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법.

청구항 9

제 7항에 있어서,

상기 최적제어 선형화단계는,

최적제어 설계단계에서 선정된 비선형 최적제어 문제를 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제로 변환시키는 공간영역화 단계; 및

상기 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 이차계획법(Quadratic Program)을 사용한 볼록 최적화(convex optimization)에 의해 공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제로 변환시키는 볼록화 단계;를 포함하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법.

청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 볼록화 단계는,

공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제에 포함된 제약조건들 중 모터의 구동 효율 및 배터리 충전 속도에 대한 제약조건을 상수값으로 고정시키는 것을 특징으로 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법.

청구항 11

제 9항에 있어서,

상기 최적제어 선형화단계는,

공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제의 제약조건 중 충전횟수에 대한 제약조건을 혼합정수 이차계획법(Mixed Integer Quadratic Programming)을 적용하여 설정하는 충전 적용단계;를 더 포함하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 운전자의 경로 선택과 주행 시간 요구사항을 반영하여 최적화가 가능하도록 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 속도 결정과 충전소 선택 그리고 충전 시간을 계획하는 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 환경 규제 준수에 대한 범세계적인 관심과 그 필요성이 증대됨에 따라, 모빌리티 업계에 적용되는 환경 규제 역시 강화되고 있다.

[0004] 특히 이산화탄소 및 질소산화물과 같은 온실가스 배출에 대한 규제가 심화되고 있으므로, 이에 대한 해결 방안으로 내연기관 차량을 대체하는 전동화 차량의 개발 및 성능 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 전동화 차량에 대한 에너지 효율 기준 역시 강화되고 있다.

[0005] 한편, 순수 전기차 및 플러그인 하이브리드 차량, 연료전지 자동차와 같은 전동화 차량의 시장 보급에 대해 걸림돌이 되는 것은 내연기관 차량에 비해 상대적으로 낮은 배터리의 에너지밀도와 미비한 충전 인프라인데, 이것은 운전자의 Range anxiety를 야기시켜 전기차의 확대 보급을 저해하는 중요한 요인 중의 하나이다.

[0006] 이러한 에너지 충전 관점에서의 전기차 단점을 보완하는 방법으로 최근 들어 최적제어 기법을 기반으로 차량의 에너지 효율을 높이고 항속거리를 늘리는 기술에 대한 연구개발이 진행되고 있는데, 그 예로는 Eco routing, Eco planning 또는 Eco-Driving(이하, '에코 드라이빙'이라 한다) 및 Eco tracking(supervisory control) 등이 있다.

[0007] 먼저, Eco routing은 출발점에서 도착점까지의 여러 경로들 중에서 최적의 에너지를 사용하는 경로를 선택하기 위한 방법이고, 에코 드라이빙은 정해진 주행 경로 상에서 도로의 경사 정보, 정체 상황, 신호등 정보 등을 커넥티비티(connectivity) 기술을 이용하여 획득하고 이를 반영한 전방 주행 환경 예측을 통하여 최적의 에너지를 사용하는 차량의 속도를 결정하는 방법이며, Eco tracking은 정해지거나 계획된 또는 운전자가 요구하는 속도를

추적하는 연전비 향상을 위한 하이브리드 차량의 파워트레인 제어 기술을 뜻한다.

- [0008] 이 중, 주행 경로가 이미 선택된 상황에서 주행 환경 예측을 통하여 최적의 에너지를 사용하는 차량의 속도 프로파일을 결정하는 에코 드라이빙에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있는데, 일예로 대한민국 등록특허공보 제10-2050790호에는 무선충전 전기차량 최적 운행정보 결정방법 및 장치가 개재되어 있다.
- [0009] 상기 종래기술은 미리 설정된 경로를 따라 운행되는 무선충전 전기차량의 최적 운행정보를 결정하고, 무선충전 전기차량 시스템을 운용하는 데 필요한 고정 비용 및 가변 비용 등을 최소화할 수 있도록 한 것에 기술적 특징이 있으나, 이는 기 설정된 경로의 실제 운행 데이터를 수집하고, 이에 대한 유효데이터를 추출한 후 통계확률 데이터를 연산하는 방식에 의해 운행정보를 결정하는 것이므로, 실제 운행 데이터가 없는 경우에는 적용할 수 없고, 그로 인해 활용이 상당히 제한적인 문제점이 있다.
- [0010] 또한, 상기 종래기술을 포함한 기존의 에코 드라이빙을 목적으로 하는 최적제어의 해를 구하는 방법으로는, 모델예측제어(MFC), 동적 계획법, 강화학습의 접근법 등이 사용되고 있는데, 이 중 가장 많이 사용되는 모델예측제어는 현재 상태를 기반으로 하여 시스템이 미래에 어떻게 동작할 것인지를 예측하는 모델을 사용하여 이러한 예측 정보를 최적화하여 얻어지는 결과를 입력으로 하여 시스템을 제어하는 방식을 의미한다.
- [0011] 이러한 모델예측제어 방법은 다른 방법들에 비해 상대적으로 높은 성능을 보일 수 있는 장점이 있지만, 기존의 방법들은 모두 비선형 모델예측제어(NMPC; Nonlinear Model Predictive Control) 방법을 사용하고 있으므로, 결과 도출에 많은 시간이 소요되고, 그로 인해 실제 전기차의 주행시 적용될 수 있도록 하는 임베디드화가 어렵다는 단점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0013] (특허문헌 0001) 1. 대한민국 등록특허공보 제10-2050790호(2019. 11. 26. 등록)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0014] 본 발명은 상기와 같은 종래기술의 문제점들을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 전기차의 주행 경로가 운전자에 의해 이미 선택된 상황에서 전비 향상, 즉 목적함수를 최소화하는 차량의 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 모델예측제어에 이차계획법을 사용한 블록 최적화, 즉 선형모델링 방법을 사용함으로써 연산 부하를 저감시킬 수 있고, 그에 따라 실시간성을 확보할 수 있도록 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법을 제공함에 있다.
- [0015] 또한, 본 발명은 자율주행 시스템 또는 운전자가 제시한 기준 충전횟수 및 주행시간 제한을 만족하는 속도계획 연산이 가능하도록 함으로써 운전자의 주행 및 충전 계획을 고려하는 지능적인 속도계획 및 충전계획 알고리즘 개발에 활용할 수 있는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법을 제공함에 다른 목적이 있다.

과제의 해결 수단

- [0017] 상기와 같은 목적들을 달성하기 위한 본 발명의 일 측면에 따른 컴퓨팅 장치에 의해 수행되는 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템은, 전기차의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차 속도의 동적 제어시스템을 모델링하는 모델링부; 전기차의 주행 경로가 주어진 상황에서의 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 최적제어 문제를 설계하는 최적제어 설계부; 상기 최적제어 설계부에서 설계된 최적제어 문제를 이차계획법을 사용한 블록 최적화를 통해 선형화하는 블록최적화 변환부; 및 상기 블록최적화 변환부를 통해 선형화된 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제에 대한 최적해를 연산하는 연산부를 포함할 수 있다.
- [0018] 이때, 상기 모델링부는, 전기차의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차의 운동방정식을 시간에 따른 함수로

모델링 하고, 상기 모델링된 운동방정식을 Euler forward method를 이용하여 이산화하며, 상기 이산화된 운동방정식을 사다리꼴 규칙(Trapezoidal rule)을 이용하여 공간 영역에서의 운동방정식으로 변환시킬 수 있다.

[0019] 또한, 상기 블록최적화 변환부는, 최적제어 설계부에서 설계된 비선형 최적제어 문제를 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제로 변환시킨 후, 상기 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 이차계획법(Quadratic Program)을 사용한 블록 최적화(convex optimization)에 의해 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제로 변환시킬 수 있다.

[0020] 그리고, 상기 블록최적화 변환부는, 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제에 포함된 제약조건들 중 모터의 구동 효율 및 배터리 충전 속도에 대한 제약조건을 상수값으로 고정시킬 수 있다.

[0021] 또한, 상기 블록최적화 변환부는, 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제의 제약조건 중 충전횟수에 대한 제약조건을 혼합정수 이차계획법(Mixed Integer Quadratic Programming)을 적용하여 설정할 수 있다.

[0022] 한편, 본 발명의 다른 측면에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법은, 컴퓨팅 장치에 의해 수행되는 전기차 최적주행 및 충전계획 방법에 있어서, 전기자의 주행 경로가 선택된 상황에서의 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 비선형 모델예측제어 방법을 이차계획법을 사용한 블록 최적화에 의해 선형화 할 수 있다.

[0023] 이때, 상기 전기차 최적주행 및 충전계획 방법은, 전기자의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차 속도의 동적 제어시스템을 모델링하는 모델링 단계; 전기자의 주행 경로가 미리 선택된 상황에서의 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 위한 목적함수들을 설정하는 목적함수 정의단계; 상기 목적함수 정의단계에서 설정된 목적함수와, 제약조건을 포함하는 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 선정하는 최적제어 설계단계; 상기 최적제어 설계 단계에서 선정된 비선형 최적제어 문제를 선형화하는 최적제어 선형화단계; 및 상기 최적제어 선형화단계를 통해 선형화 된 최적제어 문제에 대한 최적해를 연산하는 최적제어 풀이단계;를 포함할 수 있다.

[0024] 여기서, 상기 모델링 단계는, 전기자의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기자의 운동방정식을 시간에 따른 함수로 모델링하는 연속시간 모델링 단계; 상기 연속시간 모델링 단계에서 모델링된 운동방정식을 Euler forward method를 이용하여 이산화하는 이산시간 모델링 단계; 및 이산화된 운동방정식을 사다리꼴 규칙(Trapezoidal rule)을 이용하여 공간 영역에서의 운동방정식으로 변환시키는 공간영역 모델링 단계;를 포함할 수 있다.

[0025] 그리고, 상기 최적제어 선형화단계는, 최적제어 설계단계에서 선정된 비선형 최적제어 문제를 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제로 변환시키는 공간영역화 단계; 및 상기 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 이차계획법(Quadratic Program)을 사용한 블록 최적화(convex optimization)에 의해 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제로 변환시키는 블록화 단계;를 포함할 수 있다.

[0026] 이때, 상기 블록화 단계는, 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제에 포함된 제약조건들 중 모터의 구동 효율 및 배터리 충전 속도에 대한 제약조건을 상수값으로 고정시킬 수 있다.

[0027] 또한, 상기 최적제어 선형화단계는, 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제의 제약조건 중 충전횟수에 대한 제약조건을 혼합정수 이차계획법(Mixed Integer Quadratic Programming)을 적용하여 설정하는 충전 적용단계;를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0029] 진술한 본 발명의 과제 해결 수단 중 어느 하나에 의하면, 전기자의 주행 경로가 운전자에 의해 이미 선택된 상황에서 전비 향상, 즉 목적함수를 최소화하는 차량의 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 모델예측제어에 선형모델링 방법을 사용함으로써 연산 부하를 저감시킬 수 있고, 그에 따라 실시간성을 확보할 수 있으므로 임베디드 제어시스템에서의 성능 개선을 도모할 수 있을 뿐만 아니라, 실시간으로 변화하는 주변 상황 또는 임무 변화에 신속하고 능동적으로 대처할 수 있는 뛰어난 효과를 갖는다.

[0030] 또한, 주행경로 및 목적지, 방문하고자 하는 충전소의 개수 등을 입력으로 받을 수 있으므로 운전자의 요구사항을 반영한 최적제어가 가능하고, 정확한 속도 및 충전계획을 통한 전기차 운전자의 range anxiety를 해소시킬 수 있는 효과를 추가로 갖는다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 도 1은 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템을 개념적으로 나타낸 도면.
 도 2는 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법을 순차적으로 나타낸 흐름도.
 도 3은 도 2에 나타낸 본 발명 중 모델링 단계에서 사용되는 전기차에 작용하는 역학적 관계를 개념적으로 나타낸 도면.
 도 4는 연속 및 이산, 시간 및 공간 영역에서의 상태변수 및 제어 입력변수 사이의 관계를 나타낸 도면.
 도 5는 본 발명에 따른 최적주행 및 충전계획 방법과 종래의 비선형 모델예측제어 방법에 의해 얻어진 전기차의 주행시간을 비교하여 나타낸 도면.
 도 6은 본 발명에 따른 최적주행 및 충전계획 방법과 종래의 비선형 모델예측제어 방법에 의해 얻어진 전기차의 에너지 소비량을 비교하여 나타낸 도면.
 도 7 내지 도 9는 종래의 비선형 모델예측제어 방법과 본 발명에 따른 최적주행 및 충전계획 방법에 의해 얻어진 결과들을 비교하여 나타낸 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0033] 이하, 첨부된 도면들을 참고로 하여 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다.
- [0034] 이하의 내용은 단지 본 발명의 원리를 예시하는 것이므로 본 명세서에 열거된 모든 조건부 용어 및 실시예들은 원칙적으로, 본 발명의 개념이 이해되도록 하기 위한 목적으로만 명백히 의도되고, 이와 같이 특별히 열거된 실시예들 및 상태들에 제한적이지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0035] 또한, 본 명세서의 흐름도 등은 컴퓨터가 판독 가능한 매체에 실질적으로 나타낼 수 있고 컴퓨터 또는 프로세서가 명백히 도시되었는지 여부를 불문하고 컴퓨터 또는 프로세서에 의해 수행되는 다양한 프로세스를 나타내는 것으로 이해되어야 한다.
- [0036] 도면에 도시된 다양한 구성요소의 기능은 전용 하드웨어뿐만 아니라 적절한 소프트웨어와 관련하여 소프트웨어를 실행할 능력을 가진 하드웨어의 사용으로 제공될 수 있으며, 상기 기능은 단일 전용 프로세서, 단일 공유 프로세서 또는 복수의 개별적 프로세서에 의해 제공될 수 있고, 이들 중 일부는 공유될 수 있다.
- [0037] 또한 프로세서, 제어 또는 이와 유사한 개념으로 제시되는 용어의 명확한 사용은 소프트웨어를 실행할 능력을 가진 하드웨어를 배타적으로 인용하여 해석되어서는 아니되고, 제한 없이 디지털 신호 프로세서(DSP) 하드웨어, 소프트웨어를 저장하기 위한 롬(ROM), 램(RAM) 및 비 휘발성 메모리를 암시적으로 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 주지관용의 다른 하드웨어도 포함될 수 있다.
- [0039] 본 발명은 전기차의 주행 경로가 운전자에 의해 이미 선택된 상황에서 전비 향상, 즉 목적함수를 최소화하는 차량의 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 모델예측제어에 이차계획법을 사용한 볼록 최적화, 즉 선형모델링 방법을 사용함으로써 연산 부하를 저감시킬 수 있고, 그에 따라 실시간성을 확보할 수 있으며, 운전자의 요구사항을 반영한 최적제어가 가능하도록 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법에 관한 것이다.
- [0040] 이하, 도면을 참조하여 본 발명의 일 실시예에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법을 더욱 상세히 설명하도록 한다.
- [0041] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템을 개념적으로 나타낸 도면이다.
- [0042] 먼저, 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템(100)은 도 1에 나타낸 바와 같이, 크게 모델링부(110), 최적제어 설계부(120), 볼록최적화 변환부(130), 연산부(140) 및 모니터링부(160)를 포함할 수 있다.
- [0043] 보다 상세히 설명하면, 상기 모델링부(110)는 모델예측제어에 사용할 전기차(10)의 동역학 모델을 생성하기 위

한 구성으로, 상기 모델링부(110)에서는 도 3에 나타난 바와 같은, 전기차(10)의 종방향 동역학 모델을 이용하여 운동방정식, 즉 전기차(10) 속도의 동적 제어시스템을 시간에 따른 함수로 모델링할 수 있다.

[0044] 이때, 상기 모델링부(110)로는 공지된 다양한 모델링 프로그램들이 사용될 수 있으며, 상기 모델링부(110)를 이용한 전기차(10) 속도 동적 제어시스템의 상세한 모델링 과정에 대해서는 후술하기로 한다.

[0045] 다음, 상기 최적제어 설계부(120)는 전기차(10)의 주행 경로가 주어진 상황에서의 에코 드라이빙, 즉 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 최적제어 문제를 설계하기 위한 구성으로, 상기 최적제어 설계부(120)에서는 전기차(10)의 주행 경로 상에 정해진 수의 충전소가 정해진 위치에 있음을 가정함과 동시에, 전기차(10)가 제한 속도 범위 내에서 정해진 배터리 SoC(State of Charge)의 범위를 유지하며 주행하는 것으로 가정할 수 있다.

[0046] 상기 최적제어 설계부(120)에서 설계되는 최적제어 문제로는 공지된 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 사용할 수 있는데, 이에 대한 보다 상세한 설명은 후술하기로 한다.

[0047] 다음, 상기 블록최적화 변환부(130)는 최적제어 설계부(120)에서 설계된 비선형 최적제어 문제를 선형화하기 위한 구성으로, 이러한 최적제어 문제의 선형화를 통해 연산 부하를 저감시킬 수 있으므로 실시간성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 임베디드 제어시스템에서의 성능 개선을 도모할 수 있다.

[0048] 상기 블록최적화 변환부(130)에서는 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제로 변환시킨 후, 이를 다시 이차계획법을 사용한 볼록 최적화(convex optimization)에 의해 공간 영역에서의 볼록(convex) 최적제어 문제로 변환시키는 과정에 의해 최적제어 문제를 선형화할 수 있다.

[0049] 이때, 상기 블록최적화 변환부(130)에서는 선형화된 최적제어 문제의 목적함수에 대한 제약조건들 중 모터의 구동 효율(η_k)과, 배터리 충전 속도($P_{ch,k}$)를 상수값으로 고정시킬 수 있는데, 이는 후술한 연산부(140)에서의 연산시간을 단축시킬 수 있도록 하기 위함으로, 이에 대한 보다 상세한 설명 및 상기 블록최적화 변환부(130)를 통한 구체적인 선형화 과정에 대해서는 후술하기로 한다.

[0050] 다음, 상기 연산부(140)는 블록최적화 변환부(130)를 통해 선형화된 공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제에 대한 최적해를 연산하기 위한 구성으로, 공지된 선형 모델예측제어 방법, Active-set 방법 또는 Quasi-newton interior point 알고리즘을 기반으로 하는 이차계획법(Quadratic Programming)의 수치적 방법을 이용하여 공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제의 최적해를 연산할 수 있다.

[0051] 이때, 상기 연산부(140)는 최적제어 설계부(120)에서 설계된 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제나, 블록최적화 변환부(130)에서 1차 변환된 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제의 최적해를 연산할 수도 있는데, 이와 같은 비선형 최적제어 문제의 최적해 연산에는 Quasi-newton interior point 알고리즘을 기반으로 하는 비선형 계획법의 수치적 방법과 같은 공지된 비선형 모델예측방법이 적용될 수 있다.

[0052] 다음, 상기 모니터링부(160)는 전술한 모델링부(110), 최적제어 설계부(120), 블록최적화 변환부(130) 및 연산부(140)에서 각각 이루어지는 모델링, 설계, 변환 및 연산 과정 및 결과 등을 현시하기 위한 구성으로, 통상의 모니터링 수단이 사용될 수 있다.

[0053] 한편, 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템(100)은 시뮬레이션부(150)를 더 포함할 수 있는데, 상기 시뮬레이션부(150)는 연산부(140)에서 연산된 최적해들로부터 전기차(10)의 주행시간과 에너지 효율을 도출하기 위한 시뮬레이션을 진행하는 역할을 하는 것으로, 이러한 시뮬레이션에는 Matlab이나 Simulink 등의 상용화된 프로그램이 사용될 수 있다.

[0054] 이때, 상기 시뮬레이션부(150)를 이용한 시뮬레이션 결과 또한 상기 모니터링부(160)에 현시될 수 있음은 물론이다.

[0055] 또한, 상기 모델링부(110)나 최적제어 설계부(120)로는 공지된 모델링 프로그램이나 설계 프로그램이 사용될 수 있고, 상기 블록최적화 변환부(130) 및 연산부(140)로는 마찬가지로 Matlab과 같은 공지된 상용화된 프로그램이 사용될 수 있으며, 이러한 공지된 프로그램들을 이용한 구체적인 모델링, 설계, 변환 및 연산 방법들은 본 발명에서 청구하고자 하는 바가 아니므로 이에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다.

[0057] 도 2는 본 발명의 다른 측면에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법을 순차적으로 나타낸 흐름도이다.

[0058] 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 방법은 전술한 시스템(100)을 이용하여 전기차의 주행 경로가 운전자에 의해 이미 선택된 상황에서 전비 향상, 즉 목적함수를 최소화하는 차량의 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 방법에 관한 것으로, 그 구성은 모델링 단계(S10), 목적함수 정의단계(S20), 최적제어 설계단계(S30), 최적제어 선형화단계(S40) 및 최적제어 풀이단계(S50)를 포함할 수 있다.

[0059] 먼저, 상기 모델링 단계(S10)는 전술한 시스템(100)의 모델링부(110)를 통해 수행되는 과정으로, 모델예측제어에 사용할 전기차(10)의 종방향 동역학 모델을 구성하고, 상기 전기차(10)의 종방향 동역학 모델을 이용하여 전기차(10) 속도의 동적 제어시스템을 모델링할 수 있다.

[0060] 도 3은 상기 모델링 단계(S10)에서 사용되는 전기차(10)에 작용하는 역학적 관계를 개념적으로 나타낸 도면으로, 상기 모델링 단계(S10)는 연속시간 모델링 단계(S12), 이산시간 모델링 단계(S14) 및 공간영역 모델링 단계(S16)를 포함할 수 있는데, 먼저 상기 연속시간 모델링 단계(S12)에서는 도 3에 나타낸 바와 같은, 전기차(10)의 종방향 동역학 모델을 이용하여 운동방정식을 아래의 (1)식과 같이 시간에 따른 함수로 모델링할 수 있다.

[0061]
$$m\dot{v}(t) = F_m(t) - F_b(t) - F_r(t) \quad \dots \quad (1)$$

[0062] 여기서, $v(t)$ 는 전기차(10)의 종방향 속도(m/s), m 은 전기차(10)의 질량(kg)을 의미하고, $F_m(t)$ 는 모터의 견인 전동력(이하, '구동력'이라 한다), $F_b(t)$ 는 제동력을 나타낼 수 있다.

[0063] 또한, $F_r(t)$ 는 결합 하중력(Combined load force)으로, $F_r(t) = F_a(t) + F_g(t)$ 와 같이 나타낼 수 있다.

[0064] 이 중, $F_a(t)$ 는 전기차(10)에 종방향으로 작용하는 공기역학적 항력(air drag force)으로, 풍속이 상대적으로 작다고 가정하면 전기차(10)에 작용하는 공기역학적 항력은 다음의 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

[0065]
$$F_a(t) = \frac{1}{2}\rho_a C_d A_f v^2(t) \quad \dots \quad (2)$$

[0066] 여기서, ρ_a 는 공기의 밀도(kg/m³), C_d 는 항력계수, A_f 는 전기차(10)의 전단면적(m²)을 나타낸다.

[0067] 또한, $F_g(t)$ 는 전기차(10)에 작용하는 중력 및 타이어에 작용하는 구름 저항의 결합력을 의미하는 것으로 다음의 (3)식과 같이 나타낼 수 있다.

[0068]
$$F_g(t) = mg(\sin(\alpha(s(t))) + C_r \cos(\alpha(s(t)))) \quad \dots \quad (3)$$

[0069] 여기서, g 는 중력가속도(m/s²), C_r 은 구름저항계수, $\alpha(s(t))$ 는 전기차(10)의 위치($s(t)$)에서의 도로경사각을 의미한다.

[0070] 다음, 상기 이산시간 모델링 단계(S14)는 시간 영역에서의 차량 동역학 모델을 공간 영역으로 전환시키기 위한 중간단계로, 상기 연속시간 차량 동역학 모델에 Euler forward method를 적용하면, 다음의 (4)식과 같이 나타낼 수 있다.

[0071]
$$v(t + \Delta t_k) = v(t) + \frac{F_m(t) - F_b(t) - F_r(t)}{m} \Delta t_k \quad \dots \quad (4)$$

[0072] 이때, $t + \Delta t_k$ 를 t_{k+1} 이라 하면 상기 (4)식은 다시 아래의 (5)식과 같이 나타낼 수 있다.

[0073]
$$v(t_{k+1}) = v(t_k) + \frac{F_m(t_k) - F_b(t_k) - F_r(t_k)}{m} \Delta t_k \quad \dots \quad (5)$$

[0074] 여기서, $v(t_k) = v_k$ 라 할 경우, 상기 (5)식은 다시 아래의 (6)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{k+1} = v_k + \frac{F_{m,k} - F_{b,k} - F_{r,k}}{m} \Delta t_k \quad \dots \quad (6)$$

상기 (6)식에서 결합하중력에 대한 $F_{r,k}$ 는 상기 (2)식과 (3)식으로부터 다음의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{r,k} = \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f v_k^2 + mg(\sin \alpha(s_k) + C_r \cos \alpha(s_k)) \quad \dots \quad (7)$$

다음, 상기 공간영역 모델링 단계(S16)는 전술한 시간 영역에서의 전기차 동역학 모델을 바탕으로 하여 차량의 이동거리 또는 간격 기반 전방 이동거리의 인덱스(index)를 독립변수로 갖는 공간 영역에서의 전기차 동역학 모델을 정의하기 위한 과정으로, 먼저 시간 간격 $[t_k, t_{k+1}]$ 동안에 가속도가 일정하다고 가정하면, 사다리꼴 규칙(Trapezoidal rule)을 이용하여 공간간격변수와 시간간격변수 사이의 관계를 아래의 (8)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta s_k = s(t_{k+1}) - s(t_k) = \frac{v(t_k) + v(t_{k+1})}{2} \Delta t_k \quad \dots \quad (8)$$

여기서, $v(t_k) = v_k$ 라 할 경우, 상기 (8)식은 다시 아래의 (9)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t_k = \frac{2\Delta s_k}{v_k + v_{k+1}} \quad \dots \quad (9)$$

상기 (9)식을 (6)식에 대입하면, 공간 영역에서의 전기차 종방향 동역학 모델을 아래의 (10)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{k+1}^2 = v_k^2 + \frac{2\Delta s_k}{m} (F_{m,k} - F_{b,k} - F_{r,k}(v_k^2, \alpha_k)) \quad \dots \quad (10)$$

여기서, $F_{r,k}(v_k^2, \alpha_k)$ 는 v_k^2 에서의 어파인(affine) 변환(행렬곱)이고, $v_k = v(t_k) = v(s(t_k)) = v(s_k)$ 로 표시될 수 있으며, 나머지 변수들은 전술한 바와 같다.

한편, 상기 시간 및 공간 영역에서의 동역학 모델링의 정확성 향상을 위해서는 전기차(10)의 파워트레인에 구비되는 모터의 물리적인 제약조건을 고려할 수 있는데, 이는 상기 모터, 즉 전기차(10)에 통상적으로 사용되는 AC 모터(이하, '모터'라 한다)의 구동력은 모터가 발생시킬 수 있는 최대 기계적 토크 또는 모터의 회전축에 연결된 전기차(10) 바퀴의 회전 속도, 즉 전기차(10)의 속도에 의해 제한될 수 있다는 내용으로, 아래의 (11)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{F}_{m,k} = \min(\overline{F}_m, \overline{F}_{m,k}^{cp}(v_k)) \quad \dots \quad (11)$$

여기서, $\overline{F}_{m,k}$ 는 위치 k에서의 모터 최대 구동력, $\overline{F}_m$ 은 모터의 최대 구동력, $\overline{F}_{m,k}^{cp}(v_k)$ 는 위치 k에서 차량의 속도(v)에 따라 제한되는 모터의 최대 구동력을 의미하는데, 상기 (11)식은 $x_k = v_k^2$ 이라 할 경우 근사(approximation)에 의해 아래의 (12)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 \leq F_{m,k} \leq \overline{F}_m, \quad 0 \leq F_{m,k} \leq \overline{F}_{m,k}^{cp}(x_k) = \frac{\overline{P}_m}{\sqrt{x_k}} \approx c_0 + c_1 x_k \quad \dots \quad (12)$$

여기서, $\overline{P}_m$ 은 모터의 최대출력을 의미하는 것으로, 이에 따라 차량의 속도에 따라 제한되는 모터의 최대 구동력은 모터의 최대출력을 차량의 속도로 나눈 값으로 연산될 수 있음을 알 수 있고, 선형적으로 연산될 수 있음을 알 수 있다.

다음, 상기 목적함수 정의단계(S20)는 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 위한 목적함수들을 설정하기 위한 과

정으로, 주행시간 정의단계(S22), 에너지소비 정의단계(S24) 및 제동에너지 정의단계(S26)를 포함할 수 있다.

[0091] 보다 상세히 설명하면, 먼저 상기 주행시간 정의단계(S22)는 시간영역 또는 공간영역에서의 주행시간 최소화를 목적으로 하는 총 주행시간을 목적함수로 설정하기 위한 과정으로, 상기 총 주행시간(t_N)은 아래의 (13)식과 같이 설정될 수 있다.

$$t_N = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta t_k + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{ch,k} = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\Delta s_k}{v_k} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{ch,k} \quad \dots \quad (13)$$

[0092] 여기서, $\sum_{k=0}^{N-1} \Delta t_k$ 는 전기차(10)가 이동 중에 있는 운전시간(t_k)의 합을 나타내고, $\sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{ch,k}$ 는 충전소 방문시간의 합을 나타내는 것으로, $\tau_{ch,k}$ 는 k번째 위치에 있는 충전소에서 배터리를 충전하는 시간을 나타낸다.

[0093] 주행시간의 최소화를 위한 제1비용함수 $J_1 = t_N$ 이라 할 경우, 근사(approximation)에 의해 상기 (13)식을 아래의 (14)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{J}_1 = - \sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{v_k^2}{\Delta s_k^2} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{ch,k} \quad \dots \quad (14)$$

[0094] 여기서, ω_t 는 가중치로 0보다 큰 값으로 설정될 수 있다.

[0095] 다음, 상기 에너지소비 정의단계(S24)는 전기차(10)의 주행 경로가 선택된 상황에서의 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 에너지소비량을 목적함수로 설정하기 위한 과정으로, 먼저 트랙션 모드에 있는 전기차(10)의 모터 출력(P_{elec})은 아래의 (15)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{elec}(F_m, v) = \frac{F_m v}{\eta_m(F_m, v)} \quad \dots \quad (15)$$

[0096] 여기서, $\eta_m(F_m, v)$ 은 전기적 출력을 기계적 출력으로 변환시키는 모터의 효율을 의미하고, $F_m v$ 는 기계적 출력을 의미한다.

[0097] 기설정된 주행 경로에서의 에너지 소비 최소화를 위한 제2비용함수 J_2 는 아래의 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J_2 &= \sum_{k=0}^{N-1} P_{elec}(F_{m,k}, v_k) \Delta t_k = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{F_{m,k} v_k}{\eta_m(F_m, v)} \Delta t_k \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \frac{F_{m,k}}{\eta_m(F_m, v)} v_k \Delta t_k \approx \sum_{k=0}^{N-1} F_{elec}(F_{m,k}, v_k) \Delta s_k \end{aligned} \quad \dots \quad (16)$$

[0098] 여기서, $F_{elec}(F_{m,k}, v_k) = F_{m,k} / \eta_m(F_m, v)$ 를 의미하며, 상기 식 (16)은 근사(approximation)에 의해 아래의 (17)식과 같이 이차 형식(quadratic form)으로 이루어진 제2비용함수($\hat{J}_2$)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{J}_2 = \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} v_k^2 \\ F_{m,k} \\ 1 \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} q_2 & h & q_1 \\ h & r_2 & r_1 \\ q_1 & r_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k^2 \\ F_{m,k} \\ 1 \end{bmatrix} \Delta_k \quad \dots \quad (17)$$

[0099] 여기서, Δ_k 는 시간 영역(time domain)에서는 Δt_k , 즉 시간 변화량을 나타내고, 공간 영역(spatial domai

n)에서는 Δs_k , 즉 거리 변화량을 나타낼 수 있다.

상기 $P_{elec}(v^2, F_m)$ 또는 $F_{elec}(v^2, F_m)$ 의 근사를 위해 회귀모델(regression model)을 적용하면, 아래의 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{elec} \text{ or } F_{elec} \approx \begin{bmatrix} v^2 \\ F_m \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} q_2 & h & q_1 \\ h & r_2 & r_1 \\ q_1 & r_1 & h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^2 \\ F_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (18)$$

따라서, 상기 식 (18)을 식 (17)에 대입하여 제2비용함수를 다시 정리하면 아래의 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{J}_2 = \sum_{k=0}^{N-1} P_{elec}(v_k^2, F_{m,k}) \Delta t_k = \sum_{k=0}^{N-1} F_{elec}(v_k^2, F_{m,k}) \Delta s_k \quad \dots \quad (19)$$

일반적으로, 강한 볼록 프로그램(strongly convex program)의 경우, 상기 제2비용함수($\hat{J}_2$)의 헤시안 행렬(Hessian matrix)은 양의 값(positive definite)을 갖는 것으로 가정할 수 있고, 상기 회귀모델은 문제의 영역(domain)에 따라 달라질 수 있다.

따라서, 최적화 문제가 시간 영역인 경우 에너지 소비의 근사에 사용되는 상기 회귀 모델은 $P_{elec}(F_{m,k}, v_k) = F_m v / \eta_m(F_m, v)$ 가 되고, 최적화 문제가 공간 영역인 경우에는 $F_{elec}(F_{m,k}, v_k) = F_m / \eta_m(F_m, v)$ 가 회귀 모델로 사용될 수 있다.

다음, 상기 제동에너지 정의단계(S26)는 주행시간 및 에너지 소비 최소화와 연관되는 전기차(10)의 제동에너지 최소화를 목적으로 하는 제동력(F_b)을 목적함수로 설정하기 위한 과정으로, 마찬가지로 기설정된 주행 경로에서의 전기차(10)의 제동에너지 최소화를 위한 제3비용함수($\hat{J}_3$)로는 아래의 (20)식이 사용될 수 있다.

$$\hat{J}_3 = \sum_{k=0}^{N-1} (b_0 F_{b,k} + b_1 F_{b,k} v_k^2 + b_2 F_{b,k}^2) \Delta_k \quad \dots \quad (20)$$

마찬가지로, Δ_k 는 시간 영역에서는 Δt_k , 공간 영역에서는 Δs_k 를 나타내는 것이고, 상기 (20)식에 포함된 전기차(10)의 제동력을 구하기 위한 수식은 이미 공지된 것이므로 이에 대한 보다 상세한 설명은 생략하기로 한다.

다음, 상기 최적제어 설계단계(S30)는 전술한 시스템(100)의 최적제어 설계부(120)를 이용하여 전기차(10)의 주행 경로가 주어진 상황에서의 에코 드라이빙, 즉 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 목적으로 하는 최적제어 문제를 선정하기 위한 과정으로, 본 발명에서는 전기차(10)의 주행 경로 상에 정해진 수의 충전소가 정해진 위치에 있음을 가정함과 동시에, 주행시간을 최소화함과 동시에 제한 속도 범위 내에서 정해진 배터리 SoC(State of Charge)의 범위를 유지하며 주행하는 것으로 가정할 수 있다.

상기와 같은 가정 하에 최적제어 설계단계(S30)에서는 전기차(10)의 충전 및 속도 계획을 위하여 'Y. Jia, R. Jibrin, Y. Itoh and D. Gorges, "Energyoptimal Adaptive Cruise Control for Electric Vehicles in Both Time and Space Domain Based on Model Predictive Control," IFAC-PapersOnLine, Vol.52, No.5, pp.13-20, 2019, 9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC.'에 공지된 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 사용할 수 있는데, 이는 아래의 (21) 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \min \left\{ t_N + \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{m,k}^2 + \omega_b F_{b,k}^2) \right\} \\
 & \text{s.t. } v_{k+1} = \sqrt{\frac{2\Delta s_k}{m_{\text{eq}}} (F_{m,k} - F_{b,k} - F_{r,k}) + v_k^2} \\
 & t_{k+1} = t_k + \frac{\Delta s_k}{v_k} + \tau_{ch,k} \\
 & \zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{\text{cap}}} F_{m,k} + \frac{P_{ch,k}}{E_{\text{cap}}} \tau_{ch,k} \\
 & \underline{v} \leq v_k \leq \bar{v}_k \\
 & \underline{\zeta} - \delta_k \leq \zeta_k \leq \bar{\zeta} + \delta_k \\
 & 0 \leq \tau_{ch,k} \leq \bar{\tau}_{ch,k} \\
 & 0 \leq F_{m,k} \leq \bar{F}_{m,k} \\
 & 0 \leq F_{b,k} \leq \bar{F}_b \\
 & 0 \leq \delta_k \\
 & x_0 = x_{\text{init}} \quad \dots \quad (21)
 \end{aligned}$$

즉, 상기 (21)식은 $\min \left\{ t_N + \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{m,k}^2 + \omega_b F_{b,k}^2) \right\}$ 에 해당하는 목적함수와 나머지 제약조건들로 이루어져 있는데, 여기에 사용된 추가적인 변수들에 대한 설명은 아래의 (표1)에 나타난 바와 같다.

표 1

변수	설명
ζ	전기차 배터리의 SoC(State of Charge)
$\tau_{ch,k} \in \{0, 1\}$	K-번째 위치에서의 충전소 소재 유무
ω_d	슬랙변수(Slack variable)에 대한 가중치
δ_k	제약조건 완화를 위한 Slack variable
ω_e	모터 구동력 항에 대한 가중치
ω_b	차량 제동력 항에 대한 가중치
—, —	상한, 하한

상기 (21)식의 제약조건들 중 모터의 구동 효율(η_k)과, 충전 속도(charging power, $P_{ch,k}$)는 상태변수와 제어변수에 의해 결정되며, 아래의 (22)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_k = \eta_k(F_{m,k}, v_k, \zeta_k), \quad P_{ch,k} = P_{ch,k}(\zeta_k) \quad \dots \quad (22)$$

또한, 비선형 상태에서의 모터, 즉 구동력의 물리적인 제약조건은 아래의 (23)식으로 정의될 수 있으며, 여기서 $\bar{F}_m$ 및 $\bar{P}_m$ 은 각각 최대 구동력과, 모터의 최대출력을 의미한다.

$$\bar{F}_{m,k} = \min\{\bar{F}_m, \bar{F}_{m,k}^{\text{cp}}(v_k)\}, \quad \bar{F}_{m,i}^{\text{cp}}(v_k) = \frac{\bar{P}_m}{v_k} \quad \dots \quad (23)$$

또한, 여유변수(슬랙변수, δ)를 도입하여 배터리의 SoC에 대한 제약조건의 완화를 허용하는데, 이는 실시간 최적화의 경우, 배터리 충전량이 낮은 상태에서 장거리 운행계획 시, 주어진 제약조건을 만족시키는 속도 계획의

해가 없는 문제를 해결하기 위함으로, 가중치(ω_d)를 크게 설정할 경우 제약조건의 완화는 제약조건을 만족시키는 속도 계획이 있는 경우, 최적해에 영향을 미치지 않게 된다.

[0124] 그리고, 나머지 가중치 ω_e 및 ω_b 는 각각 모터의 기계적 힘과 브레이크 힘에 대한 가중치로, 상기 가중치의 조절에 의해 최적화 문제의 해를 구하는 과정에서 주행시간과 에너지 사용량의 중요도를 조절할 수 있다.

[0125] 즉, 주행시간과 에너지 소비량은 상충관계에 있으므로 주행시간 감소를 고려한 항의 가중치를 증가시키면 에너지 소비량은 증가하고, 에너지 소비량 감소를 고려한 가중치를 증가시키면 주행시간이 증가한다.

[0126] 또한, 상기 제약조건에서 m_{eq} 는 전기차(10)의 등가 중량을 의미하고, E_{cap} 는 전기차(10)에 탑재되는 배터리 용량을 의미하는 것이다.

[0127] 다음, 상기 최적제어 선형화단계(S40)는 전술한 시스템(100)의 블록최적화 변환부(130)를 이용하여 최적제어 설계단계(S30)에서 선정된 공지의 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제((21)식)를 선형화하기 위한 과정으로, 선형화를 통해 연산 부하를 저감시킴으로써 최적해를 구하는데 소요되는 시간을 대폭 단축시킬 수 있다.

[0128] 보다 상세히 설명하면, 상기 최적제어 선형화단계(S40)는 공간영역화 단계(S42), 블록화 단계(S44) 및 충전 적용단계(S46)를 포함할 수 있는데, 먼저 상기 공간영역화 단계(S42)는 전술한 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제를 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제로 변환시키는 과정으로, 이는 후술할 블록화 단계(S44)에서의 선형화를 위한 예비적인 과정일 수 있다.

[0129] 즉, 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제는 아래의 식 (24)와 같이 정의될 수 있는데, 전술한 식 (21)과 마찬가지로 minimum(min)으로 표시된 부분이 목적함수에 해당하고, 나머지 부분은 제약조건 (constraints)에 해당한다.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \left\{ - \sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{x_k}{\Delta s_k^2} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{ch,k} \right. \\
 & \left. + \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{m,k}^2 + \omega_b F_{b,k}^2) \right\} \\
 \text{s.t.} \quad & x_{k+1} = \frac{2\Delta s_k}{m_{eq}} (F_{m,k} - F_{b,k} - F_{r,k}(x_k)) + x_k \\
 & \zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{cap}} F_{m,k} + \frac{P_{ch,k}}{E_{cap}} \tau_{ch,k} \\
 & \underline{x} \leq x_k \leq \bar{x}_k \\
 & \underline{\zeta} - \delta_k \leq \zeta_k \leq \bar{\zeta} + \delta_k \\
 & 0 \leq \tau_{ch,k} \leq \bar{\tau}_{ch,k} \\
 & 0 \leq F_{m,k} \leq \bar{F}_m, \quad 0 \leq F_{m,k} \leq \bar{F}_{m,k}(x_k) \\
 & 0 \leq F_{b,k} \leq \bar{F}_b \\
 & 0 \leq \delta_k \\
 & x_0 = x_{init} \quad \dots \quad (24)
 \end{aligned}$$

[0131] 여기서, 상기 (24)식의 제약조건들 중 모터의 구동 효율(η_k)과, 배터리 충전 속도(charging power, $P_{ch,k}$)는 전술한 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제와 동일하게 상기 (22)식과 같이 나타낼 수 있고, 비선형 상태에서의 구동력의 물리적인 제약조건은 전술한 (11)식 및 (12)식을 참고하여, 아래의 (25)식에 의해 나타낼 수 있다.

$$\bar{F}_{m,k} = \min\{\bar{F}_m, \bar{F}_{m,k}^{cp}(\sqrt{x_k})\}, \quad \bar{F}_{m,i}^{cp}(\sqrt{x_k}) = \frac{\bar{P}_m}{\sqrt{x_k}} \quad \dots \quad (25)$$

[0133] 상기 공간영역화 단계(S42)에서 (24)식으로 정의되는 최적화 문제에서는 물리적인 전체 주행시간과 충전시간, 그리고 구동에너지와 기계적 제동으로 손실되는 에너지를 목적함수로 고려하였고, 여유변수(δ)를 최소화하기 위하여 목적함수에 여유변수를 포함시킬 수 있다.

[0134] 또한, 상태변수 x_k 는 k 번째 위치 또는 거리에서의 차량 속도의 제곱 v_k^2 으로 정의하고, 이에 따라 주행시간 최소화를 고려하는 시간 영역에서의 목적함수 항 t_N 은 공간 영역에서의 목적함수 항으로 변환된다.

[0135] 그에 따라, 전기차(10)에 작용하는 결합하중력(F_r)은 x_k 에 대해 어파인(Affine)하고, 상기 (7)식으로부터 아래의 (26)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{r,k}(x_k) = c_r m_v g \cos \alpha_k + m_v g \sin \alpha_k + \frac{1}{2} c_a A_f \rho_a x_k \quad \dots \quad (26)$$

[0137] 또한, 전기차(10)가 충전소가 있지 않은 구간을 지날 때에는 $k \notin \mathcal{K}$ 가 되므로, 전기차(10)가 충전소에서 소비하는 최대시간을 나타내는 $\tau_{ch,k} = 0$ 으로 정할 수 있다.

[0138] 상기 공간영역화 단계(S42)에서 (24)식으로 정의된 공간 영역에서의 이차 비용함수를 갖는 비선형 최적제어 문제의 상태변수(X_k)와 제어변수(U_k)를 정리하면 아래의 (27)식과 (28)식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$X_k := [x_k, \zeta_k]^\top \quad \dots \quad (27)$$

$$U_k := [F_{m,k}, F_{b,k}, \tau_{ch,k}, \delta_k]^\top \quad \dots \quad (28)$$

[0141] 다음, 상기 블록화 단계(S44)는 후술할 최적제어 풀이단계(S50)에서 선형 모델예측제어 방법, 보다 구체적으로는 이차계획법(Quadratic Program)의 수치적 방법을 사용하여 최적해를 구할 수 있도록 하기 위한 목적으로, 상기 공간영역화 단계(S42)에서 정의된 공간 영역에서의 이차 비용함수를 갖는 비선형 최적제어 문제를 이차계획법을 사용한 볼록 최적화(convex optimization)에 의해 공간 영역에서의 볼록(convex) 최적제어 문제로 변환하여 선형화하는 과정일 수 있다.

[0142] 상기 공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제는 아래의 (29)식과 같이 정의될 수 있는데, 전술한 최적제어 문제들과 마찬가지로 minimum(min)으로 표시된 부분이 목적함수에 해당하고, s.t.으로 표시된 나머지는 제약조건(constraints)에 해당한다.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \left\{ -\sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{x_k}{\Delta s_k^2} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{\text{ch},k} \right. \\
 & \left. + \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{\text{m},k}^2 + \omega_b F_{\text{b},k}^2) \right\} \\
 \text{s.t.} \quad & x_{k+1} = \frac{2\Delta s_k}{m_{\text{eq}}} (F_{\text{m},k} - F_{\text{b},k} - F_{\text{r},k}(x_k)) + x_k \\
 & \zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{\text{cap}}} F_{\text{m},k} + \frac{P_{\text{ch},k}}{E_{\text{cap}}} \tau_{\text{ch},k} \\
 & \underline{x} \leq x_k \leq \bar{x}_k \\
 & \underline{\zeta} - \delta_k \leq \zeta_k \leq \bar{\zeta} + \delta_k \\
 & 0 \leq \tau_{\text{ch},k} \leq \bar{\tau}_{\text{ch},k} \\
 & 0 \leq F_{\text{m},k} \leq \bar{F}_{\text{m}}, \quad 0 \leq F_{\text{m},k} \leq \bar{F}_{\text{m},k}(x_k) \\
 & 0 \leq F_{\text{b},k} \leq \bar{F}_{\text{b}} \\
 & 0 \leq \delta_k \\
 & x_0 = x_{\text{init}} \quad \dots \quad (29)
 \end{aligned}$$

여기서, 상기 (29)식의 제약조건들 중 모터의 구동 효율(η_k)과, 배터리 충전 속도($P_{\text{ch},k}$)는 $\eta_k = 0.85$, $P_{\text{ch},k} = 45$ [kW]와 같이 상수값으로 고정될 수 있는데, 이를 통해 후술할 최적제어 풀이단계(S50)에서의 최적해 연산시간을 대폭 단축시킬 수 있다.

이때, 엄밀하게는 모터의 전인과 기계적 감속이 동시에 작동하지 않도록 하는 모터 구동력($F_{\text{m},k}$)과 기계적 브레이크의 제동력($F_{\text{b},k}$)에 대한 제약조건 $F_{\text{m},k} \cdot F_{\text{b},k} \leq 0$ 을 고려해야 하지만, 전술한 공간영역화 단계(S42)에서의 최적제어 문제에서는 $F_{\text{m},k}$ 의 조건으로 모터의 회생제동을 고려하지 않았으므로, 해당 제약조건은 $F_{\text{m},k} \cdot F_{\text{b},k} = 0$ 이 된다.

여기서, $F_{\text{m},k}$ 와 $F_{\text{b},k}$ 의 양의 제곱항들로 인하여, $F_{\text{m},k} \cdot F_{\text{b},k} = 0$ 조건을 직접적으로 고려하지 않아도 상기 (29)식의 최적해는 조건을 항상 만족하게 된다.

다음, 상기 충전 적용단계(S46)는 볼록화 단계(S44)에서 변환된 공간 영역에서의 볼록(convex) 최적제어 문제의 제약조건 중 충전횟수에 대한 제약조건을 설정하기 위한 과정으로, 이를 위해 혼합정수 이차계획법(Mixed Integer Quadratic Programming)을 적용할 수 있다.

먼저, 전기차(10)의 배터리 충전횟수를 설정하기 위한 새로운 지시변수 z_k 가 도입될 수 있는데, 상기 지시변수 z_k 는 0 또는 1의 값을 가질 수 있다.

보다 상세히 설명하면, 충전소에서 전기차(10)의 배터리를 충전하지 않는 경우 지시변수 z_k 는 0의 값을 갖고, 충전소에서 전기차(10)의 배터리를 충전하는 경우 1의 값을 갖도록 설정할 수 있다.

즉, $z_k=0$ 인 경우, 충전소에서 전기차(10)의 충전에 소요되는 총 시간을 나타내는 $\tau_{\text{ch},k} = 0$ 이 되고, $z_k=1$ 인 경우, $\tau_{\text{ch},k} > 0$ 이 된다.

이와 같은 개념을 상기 식 (29)의 제약조건 중 $0 \leq \tau_{\text{ch},k} \leq \bar{\tau}_{\text{ch},k}$ 에 적용하여 변환하면, 아래의 식 (30)과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 $\tau_{\text{ch},k}$ 는 충전소에서의 대기시간을 의미한다.

$$z_k \underline{\tau}_{\text{ch},k} \leq \tau_{\text{ch},k} \leq z_k \bar{\tau}_{\text{ch},k} \text{ and } z_k \in \{0, 1\} \quad \dots \quad (30)$$

또한, 상기 충전 적용단계(S46)에서는 충전 횟수(N_{ch})에 대한 제약조건으로 다음의 (31)식을 추가할 수 있는데, 여기서 집합 $\mathcal{K}$ 는 공간 영역의 순차적 색인(index)에서 충전소가 위치한 색인의 모음을 의미한다.

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} z_k \leq N_{\text{ch}} \leq |\mathcal{K}| \quad \dots \quad (31)$$

그리고, 상기 (29)식의 제약조건들 중 배터리의 SoC에 관한 제약조건은 충전소에서의 대기시간($\underline{\tau}_{\text{ch},k}$)을 고려하여 다음의 (32)식으로 변환될 수 있다.

$$\zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{\text{cap}}} F_{\text{m},k} + \frac{P_{\text{ch},k}}{E_{\text{cap}}} z_k (\tau_{\text{ch},k} - \underline{\tau}_{\text{ch},k}) \quad \dots \quad (32)$$

따라서, 상기 충전 적용단계(S46)에서는 충전 횟수와 충전소에서의 대기시간에 대한 제약조건을 고려하여 (29)식으로 나타낸 블록화 단계(S44)에서의 최적제어 문제를 다음의 (33)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \bigg\{ & - \sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{x_k}{\Delta s_k^2} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{\text{ch},k} \\ & + \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{\text{m},k}^2 + \omega_b F_{\text{b},k}^2) \bigg\} \\ \text{s.t. } & x_{k+1} = \frac{2\Delta s_k}{m_{\text{eq}}} (F_{\text{m},k} - F_{\text{b},k} - F_{\text{r},k}(x_k)) + x_k \\ & \zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{\text{cap}}} F_{\text{m},k} + \frac{P_{\text{ch},k}}{E_{\text{cap}}} z_k (\tau_{\text{ch},k} - \underline{\tau}_{\text{ch},k}) \\ & \underline{x} \leq x_k \leq \bar{x}_k \\ & \underline{\zeta} - \delta_k \leq \zeta_k \leq \bar{\zeta} + \delta_k \\ & z_k \underline{\tau}_{\text{ch},k} \leq \tau_{\text{ch},k} \leq z_k \bar{\tau}_{\text{ch},k}, z_k \in \{0, 1\} \text{ for } k \in \mathcal{K} \\ & \sum_{k \in \mathcal{K}} z_k \leq N_{\text{ch}} \\ & 0 \leq F_{\text{m},k} \leq \bar{F}_{\text{m}}, 0 \leq F_{\text{m},k} \leq \bar{F}_{\text{m},k}(x_k) \\ & 0 \leq F_{\text{b},k} \leq \bar{F}_{\text{b}} \\ & 0 \leq \delta_k \\ & x_0 = x_{\text{init}} \end{aligned} \quad \dots \quad (33)$$

여기서, N_{ch} 는 운전자에 의해 입력될 수 있는 충전 횟수를 의미한다.

또한, 상기 충전 적용단계(S46)에서 (33)식으로 정의된 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제의 상태변수(X_k)와 제어변수(U_k)를 정리하면 아래의 (34)식과 (35)식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$X_k := [x_k, \zeta_k]^\top \quad \dots \quad (34)$$

$$U_k := [F_{\text{m},k}, F_{\text{b},k}, \tau_{\text{ch},k}, z_k, \delta_k]^\top \quad \dots \quad (35)$$

한편, 상기 (33)식에 포함된 목적함수와 제약조건들에 대해 보다 상세히 설명하면 먼저, 로 정의되는 목적함수는 총 세 개의 항을 포함하고 있다.

[0165] 첫번째 항은 $-\sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{x_k^2}{\Delta s_k^2} = -\sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{v_k^2}{\Delta s_k^2}$ 와 같이 나타낼 수 있는데, 전체 주행시간 최소화를 목적으로 하는 속도 제곱에 대한 음의 값의 합을 의미하고, 여기서, ω_t 는 사전에 정의된 비례상수이다.

[0166] $\sum_{k \in K} \tau_{ch,k}$ 로 표시되는 두번째 항은 충전소에서 전기차(10)의 충전에 소요되는 총 시간의 합을 의미하는 것으로, 여기서 집합 K는 공간 영역의 순차적 색인(index)에서 충전소가 위치한 색인의 모음을 의미한다.

[0167] $\sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{m,k}^2 + \omega_b F_{b,k}^2)$ 로 표시되는 세번째 항은 전기차(10)의 모터에서 사용되는 총 에너지와 기계적 브레이크에서 소모되는 총 에너지의 합을 의미하는 것으로, 모터 및 브레이크에서 사용되는 에너지는 각 장치에 인가되는 힘의 제곱에 비례한다고 가정한 것이다.

[0168] 여기서, 가중치로 사용되는 ω_d , ω_e 및 ω_b 는 사전에 정의되는 비례상수로 각각의 의미는 전술한 바와 같으므로, 이에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다. 단, 상기 ω_d 는 전기차(10)의 배터리의 SoC에 대한 제약조건, 즉 전기차(10)의 에너지량을 일정 범위 내로 유지하기 위한 조건의 완화를 허용하기 위한 여유변수(slack variable) δ_k 의 가중치이므로 다른 비례상수들에 비해 매우 큰 값으로 설정할 수 있다.

[0169] 다음, 제약조건들 중 $x_{k+1} = \frac{2\Delta s_k}{m_{eq}} (F_{m,k} - F_{b,k} - F_{r,k}(x_k)) + x_k$ 는 상기 (10)식에 해당하는 전기차의 종방향 동역학 모델식으로, Δs_k 는 전기차의 종방향 속도 모델에서 전방 k 번째 구역의 거리, m_{eq} 는 차량의 등가 중량, $F_{m,k}$ 는 모터로부터 전기차(10)의 네 바퀴에 인가되는 구동력, $F_{b,k}$ 는 전기차(10)에 작용하는 제동력, $F_{r,k}(x_k)$ 는 전기차(10)의 속도에 비례하여 작용하는 결합하중력, 즉 부하력을 의미한다.

[0170] 또한, $\zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{cap}} F_{m,k} + \frac{P_{ch,k}}{E_{cap}} z_k (\tau_{ch,k} - \tau_{ch,k})$ 는 전기차(10)의 SoC에 대한 역학모델식으로, E_{cap} 은 전기차(10) 탑재 배터리 용량, η_k 는 모터의 구동 효율, 즉 전기에너지의 기계에너지로의 변환 효율, $P_{ch,k}$ 는 k 번째 충전소에 위치한 충전기의 충전 전력, $z_k \in \{0,1\}$ 는 k 번째 충전소에서의 충전 여부를 결정하는 변수이며 $z_k = 1$ 와 $z_k = 0$ 는 k 번째 충전소에서 충전함 그리고 충전하지 않음을 각각 나타낸다.

[0171] 그리고 $\tau_{ch,k}$ 는 k 번째 충전소에서 배터리를 충전하는 시간, $\tau_{ch,k}$ 는 k 번째 충전소에서 충전하기 위한 대기시간으로서 만약 k 번째 충전소에 차량이 진입하는 시점에 사용 가능한 충전기가 있을 경우는 그 값은 0이 되고 사용 가능한 충전기가 없을 경우에는 대기열에서 소비하는 시간의 예측값으로 설정될 수 있다.

[0172] 다음, $\underline{x} \leq x_k \leq \bar{x}_k$ 는 과속단속, 구간단속, 그리고 교통상황 등을 반영한 운전 구간별 차량의 속도 제약조건을 의미하는 것으로, 여기서 $\underline{x}_k$ 는 하한 속도의 제곱 그리고 $\bar{x}_k$ 는 상한 속도의 제곱을 나타낸다.

[0173] 또한, $\underline{\zeta} - \delta_k \leq \zeta_k \leq \bar{\zeta} + \delta_k$ 는 전기차(10) 배터리 SoC의 수치 제약조건을 의미하는 것으로, 여기서 $\underline{\zeta}$ 와 $\bar{\zeta}$ 는 각각 전기차(10) 배터리 SoC의 하한값과 상한값을 나타내고, δ_k 는 해당 조건을 완화하기 위한 여유변수로, 전기차 배터리의 SoC에 대한 조건을 완화시킴으로서 해의 후보군이 없어지는 경우를 방지하여 실시간 최적

화 과정에서의 해 도출이 항상 이루어지도록 할 수 있다.

[0174] 그리고, $z_k \tau_{ch,k} \leq \tau_{ch,k} \leq z_k \bar{\tau}_{ch,k}$, $z_k \in \{0, 1\}$ for $k \in \mathcal{K}$ 는 충전소에서의 배터리 충전시간에 대한 제약조건으로, $\bar{\tau}_{ch,k}$ 는 충전소에서 충전을 사용 가능한 또는 운전자가 충전소에 머무를 수 있는 최대 시간을 의미하고, 나머지는 전기차 배터리의 SoC에 대한 역학모델식에서 설명한 바와 같다.

[0175] 다음, $\sum_{k \in \mathcal{K}} z_k \leq N_{ch}$ 은 이산 결정변수 $z_k \in \{0, 1\}$ 의 총합에 대한 제약조건으로, 운전자가 원하여 설정한 최대 충전 횟수를 반영할 수 있다. 즉, 자연수 N_{ch} 는 전기차(10)의 주행 경로가 운전자에 의해 이미 선택된 최초 상황에서 입력할 수 있는 값으로, 운전자가 설정하는 값이 없는 경우, 디폴트 값은 네비게이션 상에서 시작점과 종점의 경로 상에 위치한 모든 충전소의 수로 설정할 수 있다.

[0176] 그리고, 제약조건 중 $x_0 = x_{init}$ 에서 변수 하단의 0은 전기차 속도 및 충전 계획을 위한 최적화 수행의 시작점을 의미한다. 즉, 운전이 진행되면서 경로 변경, 교통상황 변화, 전기차(10)의 상태 변화를 온보드 센서, V2X 정보 등을 통하여 추정된 결과를 최적화에 반영하기 위한 새로운 계산의 시점이다.

[0177] 따라서, 제약조건 $x_0 = x_{init}$ 은 이 시점에서 전기차(10) 자체의 상태(속도, 배터리 SoC 등) 변화와 운전 환경(전방 차량들의 속도의 평균 및 분산, 교통신호 정보 등) 조건의 변화를 반영하여 전기차(10)의 종방향 속도 제어 모델 그리고 전기차 배터리 SoC 제어 모델들의 초기 조건을 매번의 최적화 시점에 반영하기 위한 조건을 나타낸다.

[0178] 한편, 상기 (33)식에서 충전소에서의 배터리 충전을 위한 대기시간이 없다고 가정할 경우, 즉 $\tau_{ch,k} = 0$ for all $k \in \mathcal{K}$ 인 경우 상기 (33)식은 아래의 (36)식과 같은 형태로 변형될 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \left\{ - \sum_{k=0}^{N-1} \omega_t \frac{x_k}{\Delta s_k^2} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \tau_{ch,k} \right. \\ \left. + \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_d \delta_k + \omega_e F_{m,k}^2 + \omega_b F_{b,k}^2) \right\} \\ \text{s.t. } x_{k+1} = \frac{2\Delta s_k}{m_{eq}} (F_{m,k} - F_{b,k} - F_{r,k}(x_k)) + x_k \\ \zeta_{k+1} = \zeta_k - \frac{\Delta s_k}{\eta_k E_{cap}} F_{m,k} + \frac{P_{ch,k}}{E_{cap}} \tau_{ch,k} \\ \underline{x} \leq x_k \leq \bar{x}_k \\ \underline{\zeta} - \delta_k \leq \zeta_k \leq \bar{\zeta} + \delta_k \\ 0 \leq \tau_{ch,k} \leq z_k \bar{\tau}_{ch,k}, z_k \in \{0, 1\} \text{ for } k \in \mathcal{K} \\ \sum_{k \in \mathcal{K}} z_k \leq N_{ch} \\ 0 \leq F_{m,k} \leq \bar{F}_m, 0 \leq F_{m,k} \leq \bar{F}_{m,k}(x_k) \\ 0 \leq F_{b,k} \leq \bar{F}_b \\ 0 \leq \delta_k \\ x_0 = x_{init} \end{aligned} \quad \dots \quad (36)$$

[0179] 다음, 상기 최적제어 풀이단계(S50)는 전술한 시스템(100)의 연산부(140)를 이용하여 최적제어 선형화단계(S40)를 통해 선형화 된 예측모델, 즉 공간 영역에서의 볼록(convex) 최적제어 문제(식(29), 식(33) 또는 식(36))의 최적해를 연산하기 위한 과정으로, 선형 모델예측제어 방법을 사용할 수 있다.

[0181] 즉, 상기 최적제어 풀이단계(S50)에서는 Active-set 방법 또는 Quasi-newton interior point 알고리즘을 기반으로 하는 이차계획법(Quadratic Programming)의 수치적 방법을 이용하여 공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제의 최적해를 연산할 수 있는데, 이와 같은 최적해의 연산 과정은 이미 공지된 것으로, 본 발명에서 권리로서 청구하고자 하는 바가 아니므로 이에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다.

[0182] 그리고, 상기 최적제어 풀이단계(S50)에서는 공간 영역에서의 속도계획법(speed planning)을 시간 영역에서의 속도계획법으로 변환시킬 수 있는데, 이러한 변환에는 도 4에 나타낸 바와 같은, 연속 및 이산, 시간 및 공간 영역에서의 상태변수 및 제어입력변수 간의 관계가 활용될 수 있다.

[0183] 즉, 상기 최적제어 풀이단계(S50)에서는 아래의 (37)식을 이용하여 공간 영역에서의 속도계획법을 시간 영역에서의 속도계획법으로 변환시킬 수 있는데, 현재 전기차(10)의 속도 $v(t_k) = v(s_k)$ 와, 다음 공간(space)에서의 속도 $v_*(s_{k+1})$ 가 주어졌을 때, 시점 $t \in [t_k, t_{k+1}]$ 에서의 목표 속도(v_{target})는 아래의 (37)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{\text{target}}(t) = v(s_k) + \frac{v_*^2(s_{k+1}) - v^2(s_k)}{2\Delta s_k}(t - t_k) \quad \dots \quad (37)$$

[0185] 여기서, 다음 샘플링 시점 t_{k+1} 은 아래의 (38)식에 의해 결정될 수 있으며, 상기 (37)식에 의한 시간 영역에서의 목표 속도 설정은 전기차 모터 피드백 제어의 기준값으로 사용될 수 있다.

$$t_{k+1} = t_k + \frac{2\Delta s_k}{v_*(s_{k+1}) + v(s_k)} \quad \dots \quad (38)$$

[0187] 한편, 상기 최적제어 풀이단계(S50)에서는 상기 (21)식에 해당하는 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제와, 상기 (24)식에 해당하는 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제에 대한 최적해를 연산하는 과정을 더 포함할 수 있는데, 상기 최적해를 얻기 위한 방법으로는 공지의 비선형 모델예측방법이 적용될 수 있다.

[0188] 즉, Quasi-newton interior point 알고리즘을 기반으로 하는 비선형 계획법의 수치적 방법을 사용하여 상기 비선형 최적제어 문제들에 대한 최적해를 얻을 수 있는데, 연산된 최적해는 전술한 이차계획법의 수치적 방법을 이용하여 연산된 공간 영역에서의 블록 최적제어 문제의 최적해와의 비교를 통해 본 발명에 따른 주행시간 및 에너지 소비 최소화를 위한 전기차의 모델예측제어 방법의 효과 검증에 활용될 수 있다.

[0189] 한편, 전술한 바와 같은 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법의 효과 검증을 위해, 상기 최적제어 풀이단계(S50)에서 연산된 최적해들로부터 전기차(10)의 주행시간과 에너지 효율을 도출하기 위한 시뮬레이션을 진행할 수 있는데, 이러한 시뮬레이션은 전술한 시스템(100)의 시뮬레이션부(150)를 통해 진행될 수 있으며, 상기 시뮬레이션부(150) 및 연산부(140)로는 Matlab이나 Simulink 등의 상용화된 프로그램이 사용될 수 있다.(검증단계(S60))

[0190] 시뮬레이션을 위한 전기차(10)의 주행 경로로는 충전소가 4개 존재하는 뮌헨-쾰른 간 573km의 주행 경로를 가정하였고, 전기차 배터리의 초기 SoC는 75%로 설정하였다.

[0191] 두 개의 비선형 최적제어 문제에 대한 배터리 충전 속도($P_{\text{ch},k}$) 및 모터의 구동 효율(η_k)은 BMW i3 42kWh 모델의 충전 프로파일과, 효율 지도(Efficiency map)에 제시된 데이터를 사용하였고, 본 발명에서 제시한 블록화된 선형 최적제어 문제에 대한 모터의 구동 효율(η_k)과, 배터리 충전 속도($P_{\text{ch},k}$)는 전술한 바와 같이, $\eta_k = 0.85$, $P_{\text{ch},k} = 45 \text{ [kW]}$ 의 상수값으로 고정하였다.

[0192] 시뮬레이션에 사용한 전기차(10)의 파라미터들은 아래의 (표 2)와 같다.

표 2

Symbol	Description	Value
m_v	Vehicle mass	1350 [kg]
e_f	Mass factor	1.06 [-]
A_f	Frontal projected area of vehicle	2.38 [m ²]
ρ_a	Air density	1.206 [kg/m ³]
c_a	Air drag coefficient	0.29 [-]
c_r	Rolling resistance coefficient	0.01 [-]
$\bar{F}_m$	Maximum traction force	5 [kN]
$\bar{F}_b$	Maximum braking force	10 [kN]
E_{cap}	Battery's energy capacity	37.9 [kWh]
$\bar{P}_{ch}$	Maximum charging power	50 [kWh]
$\underline{v}$	Minimum vehicle velocity	30 [km/h]
$\bar{v}$	Maximum vehicle velocity	150 [km/h]
ζ	Minimum SoC	0.1 [-]
$\bar{\zeta}$	Maximum SoC	0.9 [-]

[0193]

[0194]

도 7 내지 도 9는 상기 (21)식에 해당하는 시간 영역에서의 비선형 최적제어 문제(이하, 'NMPC(Nonlinear Model Predictive Control) 1'이라 한다)와, 상기 (24)식에 해당하는 이차 비용함수를 갖는 공간 영역에서의 비선형 최적제어 문제(이하, 'NMPC 2'라 한다) 및 상기 (29)식에 의해 해당하는 본 발명에 의해 제시되는 공간 영역에서의 볼록 최적제어 문제(이하, 'Linear MPC'라 한다)의 시뮬레이션 결과를 각각 나타낸 것으로, 모든 시뮬레이션에서 전기차(10)가 충전소 4곳에서 모두 배터리를 충전하였고, 속도 프로파일(Speed profile)과, 배터리 프로파일(Battery profile) 등에서 크게 다르지 않은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

[0195]

또한, 도 5 및 도 6은 각각 세 가지 시뮬레이션에서의 주행시간(Travel time)과 에너지 소비량을 비교하여 나타낸 것이고, 아래의 (표 3)은 이를 보다 구체화하여 도표화한 것으로, 총 주행시간(t_N)과 총 충전시간($\tau_{ch,k}$)에서는 큰 차이가 없었지만, 에너지 사용량(E_{mech} , E_{elec})의 경우 본 발명에 의해 제시된 'Linear MPC(선형 모델 예측제어)'가 기존의 'NMPC(비선형 모델예측제어)'에 비해 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다.

표 3

	t_N [min] (%)	$\sum \tau_{ch,k}$ [min] (%)	E_{mech} [MJ] (%)	E_{elec} [MJ] (%)
NMPC 1	360.17 (100.00)	81.94 (100.00)	117.72 (100.0)	133.16 (100.0)
NMPC 2	359.64 (99.85)	82.68 (100.90)	117.66 (99.95)	133.14 (99.98)
Linear MPC	360.66 (100.14)	81.12 (99.00)	110.05 (93.48)	123.56 (92.79)

[0196]

[0197]

또한, 세 가지 시뮬레이션에서의 연산시간(CPU Time)을 비교한 결과, 본 발명에 의해 제시된 'Linear MPC'의 경우 평균 29.49초의 연산시간을 보인 것에 비해, 'NMPC 1'과 'NMPC 2'의 경우 각각 평균 54.54초와 43.17초의 연산시간이 소요되어, 'Linear MPC' 방법이 'NMPC 1'과 'NMPC 2'에 비해 각각 46% 및 32% 만큼의 연산시간 단

측 효과를 보일 수 있음을 확인할 수 있다.

[0198] 따라서, 전술한 바와 같은 본 발명에 따른 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법에 의하면, 전기차(10)의 주행 경로가 운전자에 의해 이미 선택된 상황에서 전비 향상, 즉 목적함수를 최소화하는 차량의 속도 프로파일 및 충전계획을 결정하기 위한 모델예측제어에 선형모델링 방법을 사용함으로써 연산 부하를 저감시킬 수 있고, 그에 따라 실시간성을 확보할 수 있으므로 임베디드 제어시스템에서의 성능 개선을 도모할 수 있을 뿐만 아니라, 실시간으로 변화하는 주변 상황 또는 임무 변화에 신속하고 능동적으로 대처할 수 있으며, 주행경로 및 목적지, 방문하고자 하는 충전소의 개수 등을 입력으로 받을 수 있으므로 운전자의 요구사항을 반영한 최적제어가 가능하고, 정확한 속도 및 충전계획을 통한 전기차(10) 운전자의 range anxiety를 해소시킬 수 있는 등의 다양한 장점을 갖는 것이다.

[0200] 전술한 실시예들은 본 발명의 가장 바람직한 예에 대하여 설명한 것이지만, 상기 실시예에만 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 변형이 가능하다는 것은 당업자에게 있어서 명백한 것이다.

산업상 이용가능성

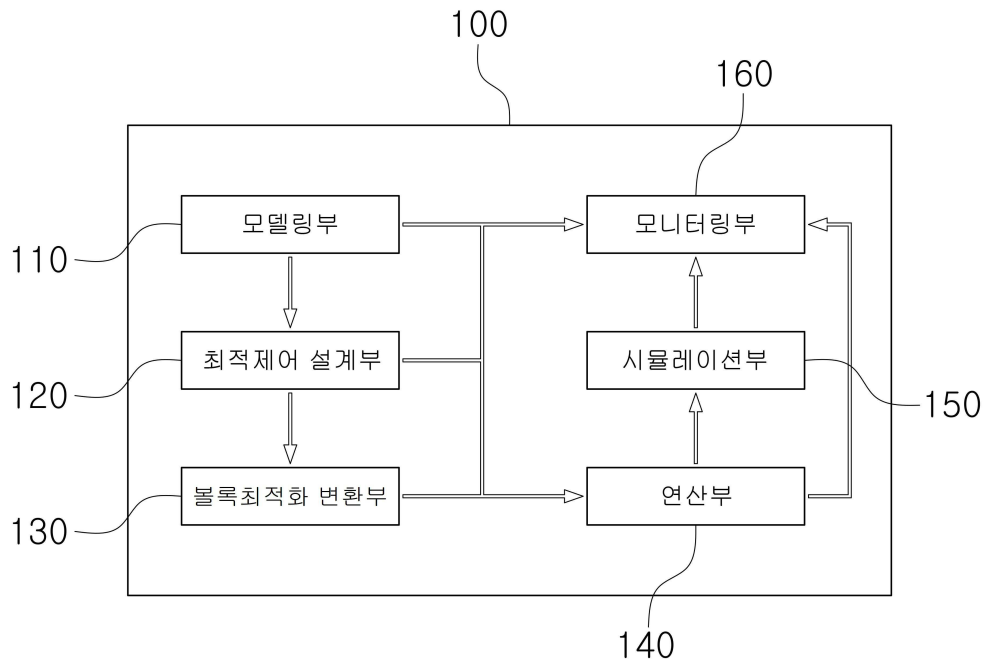
[0202] 본 발명은 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 및 충전계획 시스템 및 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 운전자의 경로 선택과 주행 시간 요구사항을 반영하여 최적화가 가능하도록 하는 모델예측제어 기반 전기차 최적주행 속도 결정과 충전소 선택 그리고 충전 시간을 계획하는 시스템 및 방법에 관한 것이다.

부호의 설명

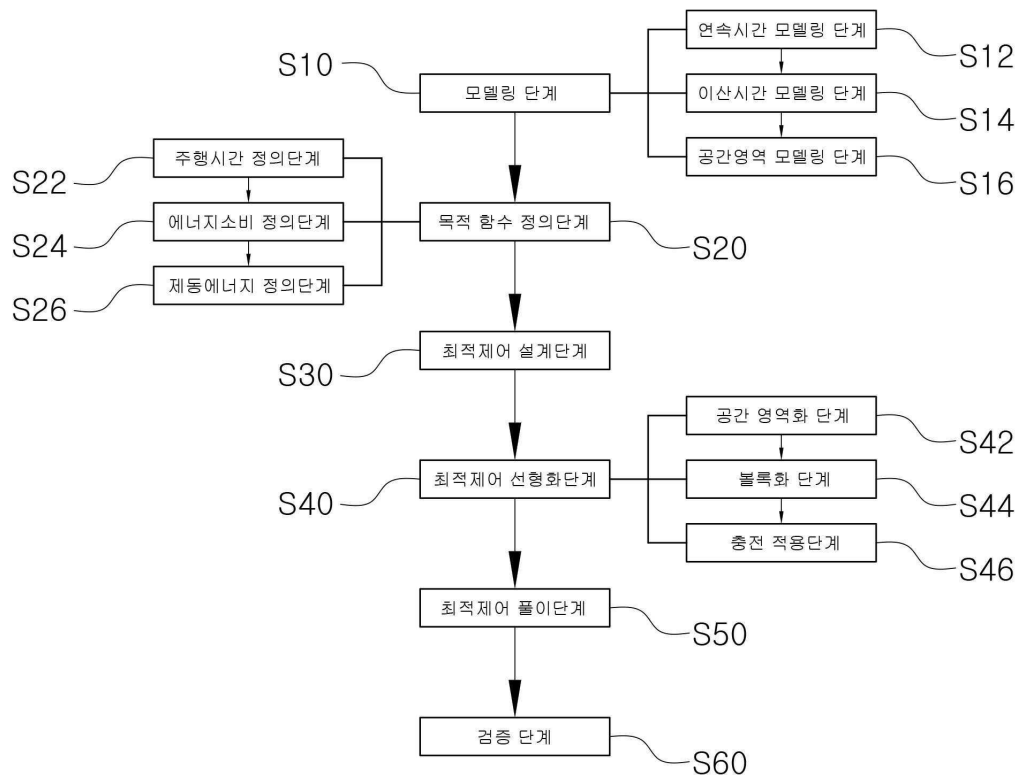
[0204] 10 : 전기차 100 : 최적주행 및 충전계획 시스템
110 : 모델링부 120 : 최적제어 설계부
130 : 블록최적화 변환부 140 : 연산부
150 : 시뮬레이션부 160 : 모니터링부
S10 : 모델링 단계 S12 : 연속시간 모델링 단계
S14 : 이산시간 모델링 단계 S16 : 공간영역 모델링 단계
S20 : 목적함수 정의단계 S22 : 주행시간 정의단계
S24 : 에너지소비 정의단계 S26 : 제동에너지 정의단계
S30 : 최적제어 설계단계 S40 : 최적제어 선형화단계
S42 : 공간영역화 단계 S44 : 블록화 단계
S46 : 충전 적용단계 S50 : 최적제어 풀이단계
S60 : 검증단계

도면

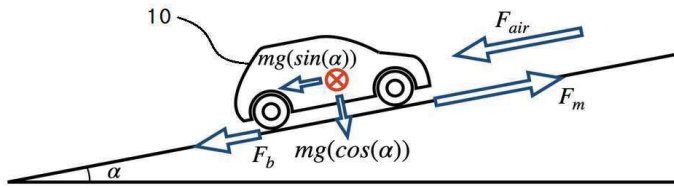
도면1



도면2



도면3



도면4

Heterogeneous Domains: Time vs. Spatial Domain

$$mv(s) \frac{dv}{ds}(s) = F_w(s) - \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f v^2(s) - C_r mg - mg \sin(\alpha(s)) - F_b(s)$$

Spatial OCP

$$x(k) = \begin{pmatrix} t(s_k) \\ v(s_k) \end{pmatrix}$$

$$\text{or } x(k) = \begin{pmatrix} t(s_k) \\ v(s_k) \\ t_r(s_k) \end{pmatrix}$$

$$u(k) = \begin{pmatrix} F_w(s_k) \\ F_b(s_k) \end{pmatrix}$$

$$\Delta t_k = \frac{2\Delta s_k}{v(k) + v(k+1)}$$

$$m \frac{dv}{dt}(t) = F_w(t) - \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f v^2(t) - C_r mg - mg \sin(\alpha(s(t))) - F_b(t)$$

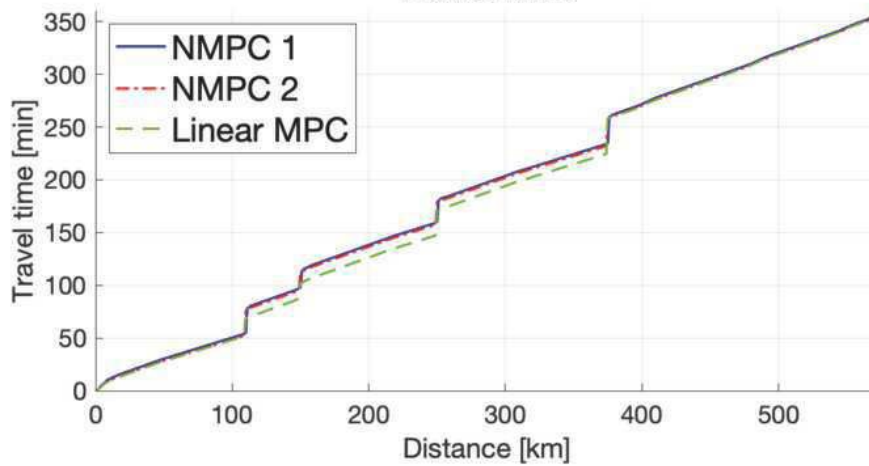
Temporal OCP

$$x(k) = \begin{pmatrix} s(t_k) \\ v(t_k) \end{pmatrix}$$

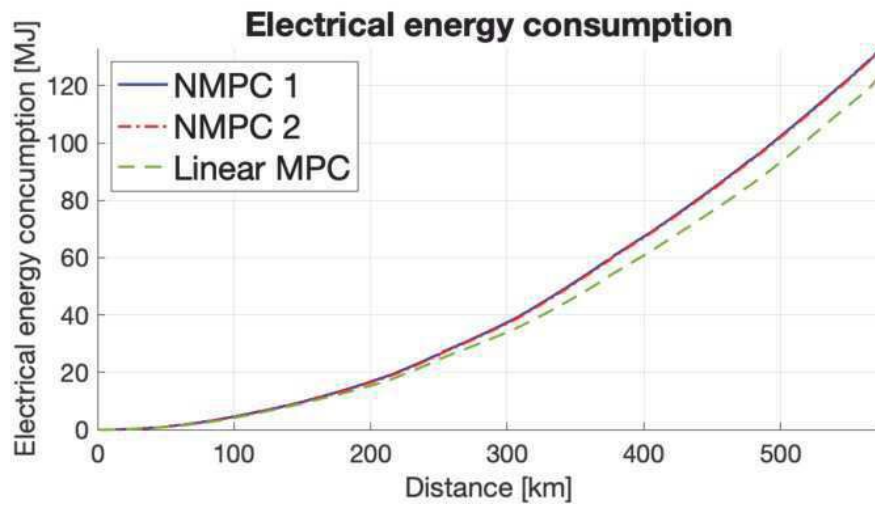
$$\text{or } x(k) = \begin{pmatrix} s(t_k) \\ v(t_k) \\ s_r(t_k) \end{pmatrix}$$

$$u(k) = \begin{pmatrix} F_w(t_k) \\ F_b(t_k) \end{pmatrix}$$

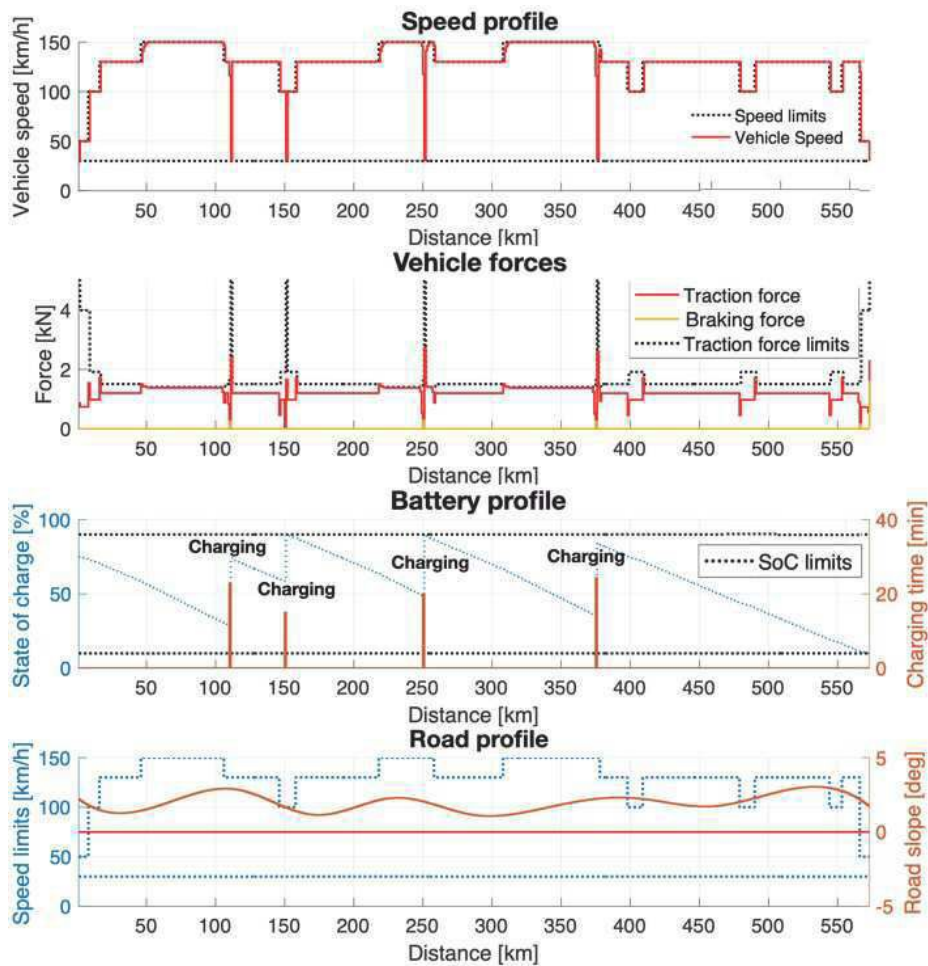
Travel time



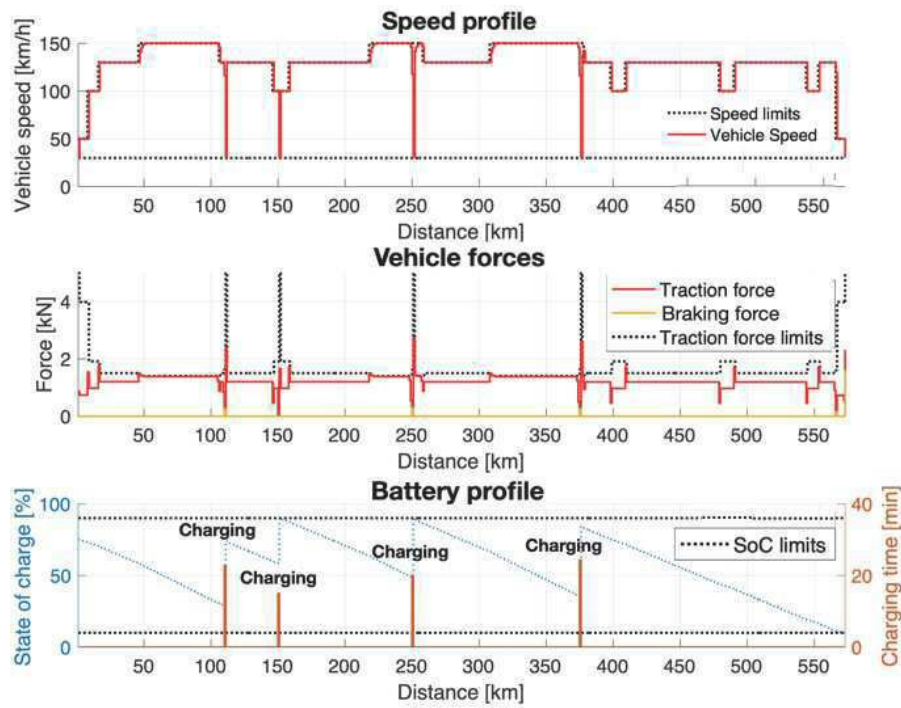
도면6



도면7



도면8



도면9

