



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

에너지 효율 향상과 시스템 안정성 확보를 위한
보조배터리 제어 연구

Supplementary Battery Control for the
enhancement of energy efficiency and system
stability

이 덕 희

한 양 대 학 교 대 학 원

2017년 2월

석사학위논문

에너지 효율 향상과 시스템 안정성 확보를 위한
보조배터리 제어 연구

Supplementary Battery Control for the
enhancement of energy efficiency and system
stability

지도교수 윤 상 원

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출합니다.

2017년 2월

한 양 대 학 교 대 학 원

자동차 전자제어 공학과

이 덕 희

이 논문을 이덕희의 석사학위 논문으로 인준함

2017년 2월

심 사 위 원 장 : 허 건 수



심 사 위 원 : 윤 상 원



심 사 위 원 : 박 장 현



한양대학교 대학원

국 문 요 지

최근 자동차의 전자부하 시스템은 편의시스템인 AVN(Audio, Video, Navigation) 등 이외에도 자동차의 전자제어에 필수 장치인 ECU 등이 점차 증가하고 있는 추세이다. 따라서 자동차의 전력시스템은 더욱 중요해졌으며, 안정적으로 자동차의 전기부하에 전력을 공급하는 것이 매우 중요하다.

이에 따라 안정적인 전력 공급과 연비 향상을 위해 태양전지와 같은 추가 전력 공급원의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 추가 전력 공급원은 환경조건에 따라 비선형성이 매우 강하여, 실제 주행 중에 사용하기 위해서는 에너지 저장 장치인 배터리가 필수적으로 필요하다.

본 논문에서는 자동차의 기존배터리와 추가된 보조배터리를 사용함에 있어 배터리의 특성을 고려하여 각 배터리의 사용 효율을 향상시키기 위한 배터리의 방전 전류 제어 시스템을 제안하였다. 배터리의 용량은 배터리의 온도와 방전 전류의 크기에 따라서 실제 용량과 다르게 나타나는 특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 배터리의 특성 중 배터리의 방전 전류에 따라 용량이 다르게 나타나는 특성을 고려한 배터리의 방전 전류 제어 방식을 제안한다.

보조배터리는 자동차의 중량 증가 및 공간 확보를 고려하여 에너지 밀도가 높은 리튬이온 배터리로 선정하였다. 자동차 전기부하의 정격 전압을 고려하여 리튬이온 배터리의 전압 상승과 방전 전류를 제어하기 위해 컨버터를 사용한다. 컨버터를 제어하기 위해서 컨버터를 모델링하고 출력 전압을 측정하여 인덕터 전류를 추정하는 추정기와 출력 전압을 제어하는 제어기를 설계하여 보조배터리의 방전 전류를 제어한다. 또한 본 논문에서는 방전 전류를 제어하는 메커니즘을 설명하고, 회로도 및 시스템 구성을 제안한다.

본 연구에서의 듀얼 배터리 시스템은 배터리의 상태와 자동차 전기부하에 따라 각 배터리의 사용 효율을 향상시키는 방전 전류를 결정하고 제어하는 시스템이다.

Key words : 전류 제어, 부스트 컨버터, 컨버터 제어, 듀얼 배터리 시스템

List of Tables

Table. 2.1 2차 전지 특성 비교	8
Table. 4.1 SOC를 추정하는 수학적 방법의 분류	35
Table. 4.2 알고리즘 파라미터	37
Table. 5.1 Battery parameters	38
Table. 5.2 배터리 사용시간 비교	41



List of Figures

Fig. 2.1 듀얼 배터리 시스템 구성도	10
Fig. 2.2 듀얼 배터리 시스템 회로도	10
Fig. 3.1 부스트 컨버터 회로도	11
Fig. 3.2 부스트 컨버터 스위치 OFF 상태에서 회로 구동	12
Fig. 3.3 부스트 컨버터 스위치 ON 상태에서 회로 구동	12
Fig. 3.4 부스트 컨버터 스위치 ON/OFF 상태에 따른 동작 파형	13
Fig. 3.5 부스트 컨버터 스위치 OFF 등가회로	14
Fig. 3.6 부스트 컨버터 스위치 ON 등가회로	17
Fig. 3.7 소자 특성을 고려한 부스트 컨버터 스위치 OFF 등가회로	21
Fig. 3.8 소자 특성을 고려한 부스트 컨버터 스위치 ON 등가회로	21
Fig. 3.9 Output feedback control	25
Fig. 3.10 Observer design	26
Fig. 3.11 보조배터리 방전 전류 제어 회로	31
Fig. 4.1 보조배터리 방전 전류 제어 알고리즘	36
Fig. 5.1 알고리즘 구동 결과	39
Fig. 5.2 개별 사용 시 배터리 사용시간	40
Fig. 5.3 듀얼 배터리 시스템 적용 시 배터리 사용시간	41

차 례

국 문 요 지	I
List of Tables	II
List of Figures	III
1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 듀얼 배터리 시스템의 기존 연구	3
1.3 연구 목표	4
2. 2차 전지의 종류 및 특성	5
2.1 2차 전지의 종류	5
2.1.1 납-산 배터리	5
2.1.2 리튬이온 배터리	7
2.2 배터리의 특성	9
2.2.1 온도 영향에 따른 특성	9
2.2.2 C-rate 효과 특성	9
2.3 본 연구의 배터리 구성	10
3. 컨버터 모델링 및 제어	11
3.1 부스트 컨버터 모델링	11
3.1.1 부스트 컨버터의 동작	12
3.1.2 Switch OFF 상태	14
3.1.3 Switch ON 상태	17
3.1.4 부스트 컨버터 모델링	19
3.1.5 소자 특성을 고려한 부스트 컨버터 모델링	21
3.2 부스트 컨버터 제어	25

3.2.1 추정기 설계	26
3.2.2 제어기 설계	27
3.2.3 추정기와 제어기의 안정성 검증	28
3.3 보조배터리 방전 전류 제어	30
3.3.1 방전 전류 메커니즘	30
4. 알고리즘	34
4.1 알고리즘 목표	34
4.2 알고리즘 구현	35
5. 시뮬레이션 결과	38
5.1 알고리즘 구동 결과	38
5.2 연구 목표 결과 검증	40
6. 결 론	43
참 고 문 헌	44
ABSTRACT	45

제1장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 자동차의 전력시스템은 운전자의 편의 장치인 Navigation, Video, Audio 등 이외에도 자동차의 전자제어에 필수 장치인 ECU 등 자동차의 전기부하 시스템은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 배터리 또한 초기 시동 역할뿐만 아니라 전자장비의 과부하 시 전력을 공급하는 에너지원으로 이용되고 있으며, 자동차의 전력 시스템의 전력 공급원인 알터네이터와 배터리의 안정성 확보를 위해 추가적인 전력 공급원이 필요하다.

특히 전기부하의 사용량이 급증하는 여름철의 경우 저속 운행 등으로 인해 알터네이터가 충분한 전력량을 공급하지 못할 경우 배터리가 부하에 전력을 공급하게 되고, 이러한 상황이 지속되면 배터리가 방전될 가능성이 있다. 하이브리드와 전기차를 제외한 일반적인 가솔린, 디젤차의 경우 메인 배터리는 Pb 배터리로 구성되어 있다. 납 배터리는 방전(전압이 약 10.3V 이하로 내려가는 상황)이 될 경우 이후 주 역할인 자동차의 시동 할 수 없으며, 배터리 안정성과 수명에도 큰 영향을 미친다. 자동차의 전기부하 시스템이 증가하는 상황에서 이러한 경우를 방지하고, 안정적인 전력공급을 위해서는 알터네이터의 전력량 또한 마찬가지로 증가해야 한다. 하지만 알터네이터의 전력은 엔진에서 열에너지가 변환된 기계에너지를 전기에너지로 변환한 에너지이다. 즉 알터네이터의 전력량을 증가시키기 위해서는 두 번의 에너지 변환 과정에서 손실되는 에너지도 증가함을 의미한다. 특히 최근에는 Idle Stop & Go system 등 정차 시 엔진이 공회전 되는 구간을 줄여 연비를 향상시키는 기술 또한 배터리의 상태에 따른 영향이 매우 크다.

따라서 지속적으로 증가하게 될 자동차 전기부하의 전력량을 안정적으로 공급하기 위한 추가적인 전력공급원이 필요하며 이와 관련된 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그 중 가장 활발한 연구 주제는 태양전지이다. 하지만 태양전지의 출력은 일사량, 표면 온도, 그림자 등에 비선형성을 보이며, 이를 안정적으로 공급하기 위해서는 태양전지의 출력을 충전 후 전력을 공급할 추가적인 배터리를 필요로 한다.

본 논문에서는 추가된 보조배터리와 기존 배터리를 사용하여 전기부하에 전력을 공급함에 있어 배터리의 방전 특성을 고려하여, 각 배터리의 총 사용시간을 향상시키는 연구를 진행한다. 배터리의 경우 방전 전류가 증가할수록 배터리의 용량 대비 실제 사용 용량은 줄어들고, 그 차이가 클수록 현격하게 감소한다. 배터리의 효율을 향상시키는 연구는 각 배터리의 셀 밸런싱 제어를 통한 효율 향상, 배터리의 스위칭을 통한 효율 향상 등 많은 연구가 진행되어 있지만 본 연구에서는 기존과 새로운 접근 방법은 제안하였다.

본 연구에서는 각 배터리의 사용시간을 향상시키는 방전전류량을 결정하는 알고리즘을 통해 추가된 보조배터리의 방전전류를 제어함으로써 각 배터리의 총 사용시간 향상과 전기부하의 과부하 시 기존 배터리의 방전 상황을 방지하는 안정성 확보를 검증하였다.



1.2 듀얼 배터리 시스템의 기존 연구

기존 듀얼배터리 시스템의 연구 중 배터리의 에너지 효율을 향상시키는 연구는 여러 분야에서 많은 연구가 진행된 반면 자동차의 분야에서는 상대적으로 미흡하다. 셀 밸런싱 연구와 스위칭 제어를 통한 배터리 효율 향상 연구가 배터리 에너지 효율 향상을 위한 기존 연구의 주 연구 분야이다.

현재 사용되는 배터리는 단일 셀이 결합된 다수의 셀로 구성되어 있다. 이러한 다수 셀들은 충전과 방전 시 전기적인 특성이 달라지며, 특히 충방전 횟수가 반복되어 배터리가 노화된 경우 각 셀의 노화는 다르게 진행된다. 이러한 셀 불균형 상태는 각 셀들의 전압차이를 발생시키고 충방전 효율을 감소시키는 원인이 된다. 셀 밸런싱의 구현 방법에 관한 연구는 많이 진행되었지만, 각 셀들의 균형을 맞추는 방식은 크게 패시브 방식과 액티브 방식으로 구분된다. 패시브 방식은 단순히 전압이 높은 쪽 셀의 에너지를 소모시켜 전압을 낮춰 균형을 맞추는 방식이며, 액티브 방식은 에너지의 소모 없이 전압이 높은 쪽의 셀에서 낮은 쪽의 셀로 에너지를 이동시켜 균형을 맞추는 방식이다. 기존 연구는 이러한 각 셀들의 전압차이를 최소화시켜 배터리의 효율과 수명을 향상시키는 셀 밸런싱 연구가 진행되고 있다.

또한 자동차에서 기존 배터리의 안정성 확보를 위한 듀얼배터리 시스템이 상용화되고 있다. 듀얼 배터리 시스템은 엔진 시동을 위한 배터리와 자동차의 전기부하에 전력을 공급하는 배터리를 구분하여, 기존 배터리는 초기 엔진 시동용으로만 사용하며 충전 이후에는 자동차의 전력시스템에서 분리되는 구조이다. 분리된 기존 배터리는 다음 시동 시에 사용되며, 시동 이후에는 추가된 보조배터리가 전기부하에 전력을 공급함으로써 보조배터리가 방전되더라도 기존 배터리의 안정성과 수명에 문제를 방지한다.

이러한 관점에서 본 논문은 기존 연구와 달리 배터리의 특성을 고려하여, 기존 배터리와 추가된 배터리의 방전 전류를 제어함으로써 배터리의 사용 시간 향상시키는 방법에 관한 연구이다.

1.3 연구 목표

본 논문에서는 배터리의 방전 전류 소모량에 따른 배터리의 실제 사용할 수 있는 용량이 달라지는 방전 특성을 고려하여 기존 배터리와 추가된 보조배터리의 방전 전류를 결정하고 제어함으로써 각 배터리의 사용시간 향상 및 기존 배터리의 안정성을 향상시킬 수 있는 보조배터리 제어 시스템을 제안한다. 정해진 전기부하의 전력을 공급함에 있어 보조배터리의 방전 전류를 제어함으로써 기존 배터리의 방전 전류가 제어되는 밸런스 제어 시스템을 제안하며 이를 검증하는 것을 목표로 한다.

상세 연구 목표는 다음과 같다.

- 1) 기존 배터리 및 추가된 보조배터리의 총 사용시간 향상
- 2) 기존 배터리의 방전 상황을 고려 안정성 향상

제2장 2차 전지의 종류 및 특성

이 장에서는 2차 전지의 종류와 특성을 기술하고, 본 연구에 적합한 배터리를 선정한다. 선정된 배터리로 시스템을 구성하고

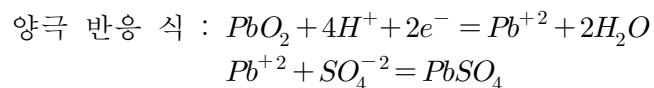
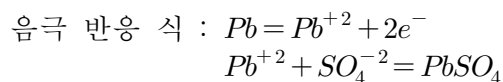
2.1 2차 전지의 종류

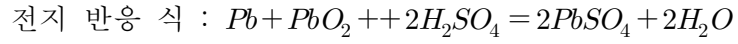
한 번 쓰고 버리는 1차 전지와 달리 2차 전지는 외부의 전기에너지를 다시 화학 에너지의 형태로 저장할 수 있는 전지를 말한다. 즉, 충전을 통하여 전지를 사용 전 초기 상태로 되돌려 재사용할 수 있는 전지이다.

이러한 2차 전지의 종류는 대표적으로 1800년대에 개발된 납축전지(Pb-acid)와 니켈-카드뮴 전지, 1990년대에 개발된 니켈-수소(Ni-MH)전지와 리튬이온(Li-ion)전지가 있다. 이 장에서는 자동차의 배터리로 사용되는 납축전지와 보조배터리로 사용될 리튬이온 배터리의 특성을 기술하고 본 연구의 목표를 달성하기 위한 듀얼 배터리 시스템을 구성한다.

2.1.1 납-산 배터리

납축전지는 2차 전지 중 가장 널리 알려진 전지이며, 1800년대에 개발되어 아직까지 광범위하게 사용되어지고 있는 전지이다. 충방전이 가능한 가장 오래된 전지로 자동차의 배터리인 SLI(starting, Lightning & ignition)용으로 사용되고 있다. 납축전지는 음극과 양극은 납(Pb)과 산화납(PbO_2)이며, 전해액은 황산 수용액으로 약 2V의 전압을 갖는 전지이다. 충전 시에는 2.5V까지 상승하며, 전지 반응은 다음과 같다.





전해액 황산 수용액은 각 이온의 이동 매개체 역할을 하며 실제 전지 반응식에는 포함되지 않는 것을 볼 수 있다.

납축전지는 오랜 개발 기간만큼 신뢰성과 열에 강한 특성을 가지고 있어 엔진룸의 환경에서도 경쟁력이 있어 자동차의 배터리로 사용되지만 배터리 특성에 단점 역시 존재한다. 납축전지는 과방전 시 성능뿐만 아니라 배터리의 수명에도 큰 영향을 미친다. 과방전이 되면 황산화가 진행되고 이는 배터리의 충전을 방해한다. 이런 황산화만 방지한다면 니켈-카드뮴이나 니켈-수소 전지보다 유지보수에서도 경쟁력을 가진다.



2.1.2 리튬이온 배터리

리튬이온 전지는 1990년대에 개발된 전지로, 리튬은 금속들 중에서도 가장 가벼운 금속으로 2차 전지 종류 중에서도 에너지 밀도가 크며, 기존 2차 전지와 다른 특징과 장단점을 가지고 있다. 기존의 2차 전지들은 자유전자를 포함하는 금속을 음극으로 사용하지만 리튬이온 전지는 음극이 흑연으로 이루어져 있으며, 리튬 공급원이 존재하지 않는다. 이는 충방전 과정에서 리튬이 유실될 경우 전지의 용량 저하의 원인이 된다. 따라서 이를 방지하기 위하여 보호회로가 반드시 필요하다. 안정성뿐만 아니라 성능에도 큰 영향을 미치는 보호회로는 리튬이온 전지와 항상 함께 생각되어야 한다.

리튬이온 전지의 또 다른 특징은 기존의 2차 전지의 출력 전압보다 높은 전압을 갖는다. 약 3.6V의 전압을 가지며, 충전 시 전압은 4.2V 이다. 보호회로는 배터리의 과충전 상태인 약 4.3V 이상이 되는 것을 방지하며, 또한 과방전 상태인 약 2.2V 이하로 떨어지면 전류의 흐름을 막는 역할을 한다. 또한 온도가 일정 상태 이상 올라가면 전류를 막는 퓨즈 역할을 가지고 있다.

자동차의 보조배터리를 고려할 때 추가된 보조배터리로 인한 중량 증가뿐만 아니라 위치할 공간과 배터리의 부피 등 고려해야 할 사항이 많다. 외부 전력원의 전력 공급으로 충전되는 것을 고려하여 용량과 배터리의 종류를 선택하여야 한다. 리튬이온 배터리는 2차 전지 중에서도 에너지 밀도가 크며, 메모리 효과가 존재하지 않아 태양전지 등 외부 전력원의 충전용으로 사용하기에도 적합하다. 이 때, 배터리의 용량 선택은 외부 전력원의 출력을 고려하여 선정한다.

다음은 2차전지의 에너지 밀도, 셀 공칭 전압 등 특성을 비교한 표는 다음과 같다.

특성	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion
에너지 밀도	33Wh/kg	45Wh/kg	70Wh/kg	120Wh/kg
셀 공칭 전압	1.5V	1.2V	1.2V	3.6V
과충전 허용범위	높음	보통	낮음	낮음
음극	납	카드뮴	수소저장 합금	흑연
전해액	황산	수산화칼륨	수산화칼륨	유기용매
안전장치 유무	열에 강함			보호회로 필수
용도	자동차 SLI용 산업용 전지	전동공구 비행기 SLI용	전동공구 HEV용	휴대폰, 노트북 HEV, EV 등

Table.2.1. 2차 전지 특성 비교

2.2 배터리의 특성

배터리의 전압과 용량은 배터리의 기본 특성으로 전압의 경우에는 배터리의 종류가 정해지면 변경하기 어려운 조건이다. 각 배터리의 셀은 공칭 전압이 결정되어 있기 때문이다. 이외에는 각 셀의 직병렬 연결 조합으로 출력 전압과 용량을 결정할 수 있다.

배터리의 주요 특성으로는 방전 특성, 온도 특성, 수명 특성 등이 있으며 본 연구에서는 방전 특성을 고려하여 배터리 효율(사용 시간)을 향상시키는 것이 목표이다.

2.2.1 온도 영향에 따른 특성

배터리는 온도에 따라 방전 효율이 달라진다. 상온에서 방전이 100% 진행된다 가정했을 때 고온에서는 100%이상이 방전되며, 저온에서는 상온보다 방전 효율이 떨어진다. 이는 추운 겨울에 자동차의 시동이 잘 걸리지 않는 현상과 같다. 따라서 자동차의 시동용 배터리는 저온에서 특성이 우수해야하는 조건을 가지고 있다.

2.2.2 C-rate 효과 특성

C-rate란 배터리의 방전 특성 중 하나로 배터리의 용량을 1시간에 모두 방전 시키는 방전 속도를 1C로 정의한다. 이 때, 2C는 30분, 4C는 15분으로 생각 될 수 있으나 실제 방전 용량은 고전류로 방전할 경우 현격하게 줄어든다.

즉, 방전 전류에 의해 실제 사용할 수 있는 배터리의 용량은 달라지며, 본 연구에서는 이러한 방전 특성을 고려하여 배터리의 효율을 향상시킨다. 기존 자동차의 배터리 시스템에서는 하나의 배터리가 존재하여 방전 전류를 조절할 수 없었지만, 본 연구에서는 추가된 보조배터리와 기존 배터리의 방전 전류를 조절함으로써 듀얼 배터리 시스템을 구성하고, 배터리의 효율을 향상시킨다.

2.3 본 연구의 배터리 구성

본 연구에서 듀얼 배터리 시스템 구성은 다음과 같다. 듀얼 배터리는 기존 자동차의 배터리인 납산 배터리와 추가된 보조배터리인 리튬이온 배터리로 구성되어 있다. 이외에 보조배터리의 방전 전류 제어를 위한 컨버터가 존재하며, 각 배터리의 전력을 소모할 자동차의 전기부하를 포함한 시스템을 그림.2.5과 같이 구성한다.

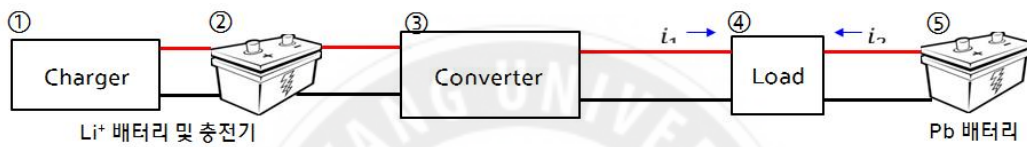


Fig.2.1 듀얼 배터리 시스템 구성도

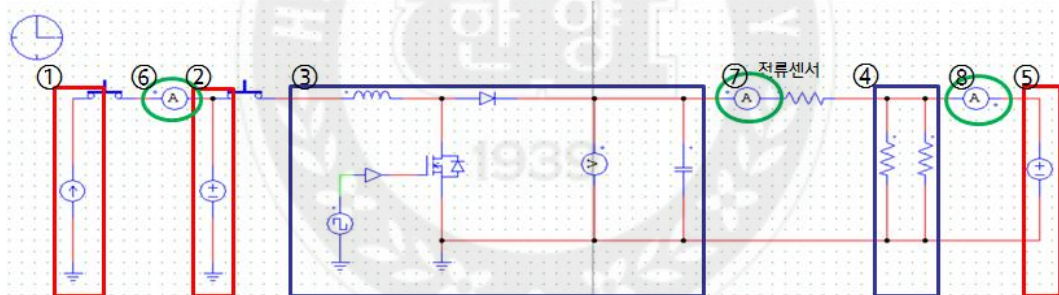


Fig.2.2 듀얼 배터리 시스템 회로도

제3장 컨버터 모델링 및 제어

이 장에서는 컨버터를 제어하기 위해 필요한 상태방정식을 정의한다. 컨버터의 동작 상태에서의 출력 전압과 인덕터 전류를 수식으로 표현하고 이를 바탕으로 상태방정식을 정의한다. 정의된 컨버터의 상태방정식으로부터 인덕터 전류를 추정하는 Observer와 출력전압을 제어하는 제어를 설계한다.

3.1 부스트 컨버터 모델링

부스트 컨버터의 상태는 스위치(Power MOSFET)의 동작에 따라 달라지며, 스위치 ON/OFF 상태에 따라 컨버터의 동작이 결정된다. 각각의 상태에 따라 부스트 컨버터의 회로 동작을 살펴보고 이를 수식적으로 표현하여 상태방정식으로 표현되도록 모델링한다. 일반적인 부스트 컨버터의 회로는 그림 3.1 과 같다.

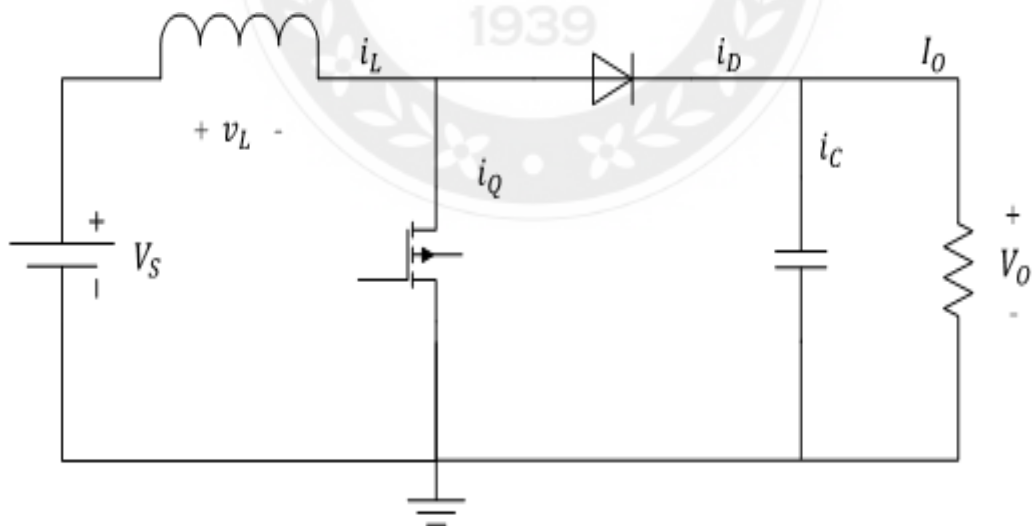


Fig.3.1 부스트 컨버터 회로도

3.1.1 부스트 컨버터의 동작

부스트 컨버터 회로 소자 중 스위치(MOSFET)의 OFF 상태에 따른 회로 구동은 그림 3.2와 같이 동작하며, ON 상태에 따른 회로 구동은 그림3.3과 같이 동작한다.

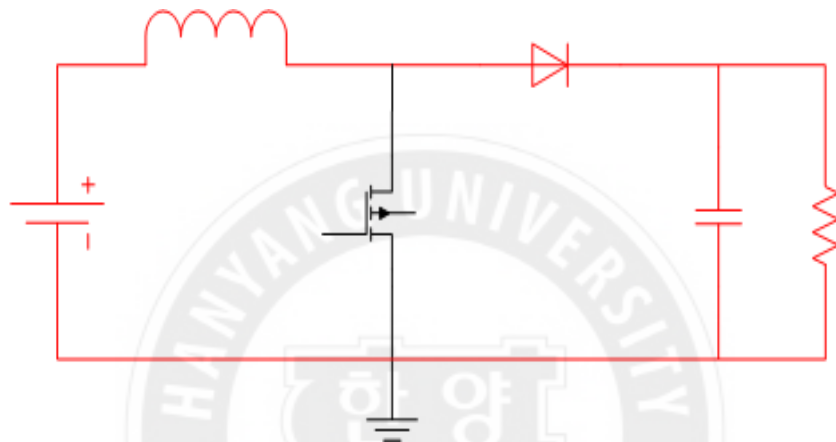


Fig.3.2. 부스트 컨버터 스위치 OFF 상태에서 회로 구동

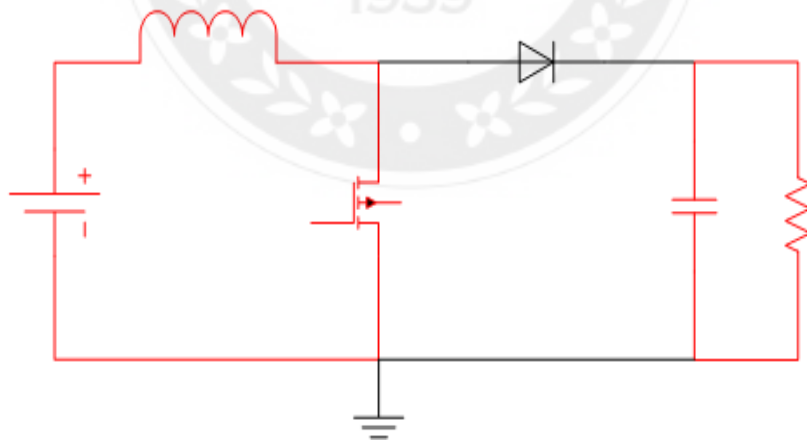


Fig.3.3. 부스트 컨버터 스위치 ON 상태에서 회로 구동

각 동작구간에 따른 주요 파라미터의 동작 파형은 그림3.4와 같이 나타나며,

동작 구간에 따른 컨버터의 회로 동작을 수식으로 표현하여 상태방정식을 얻을 수 있다.

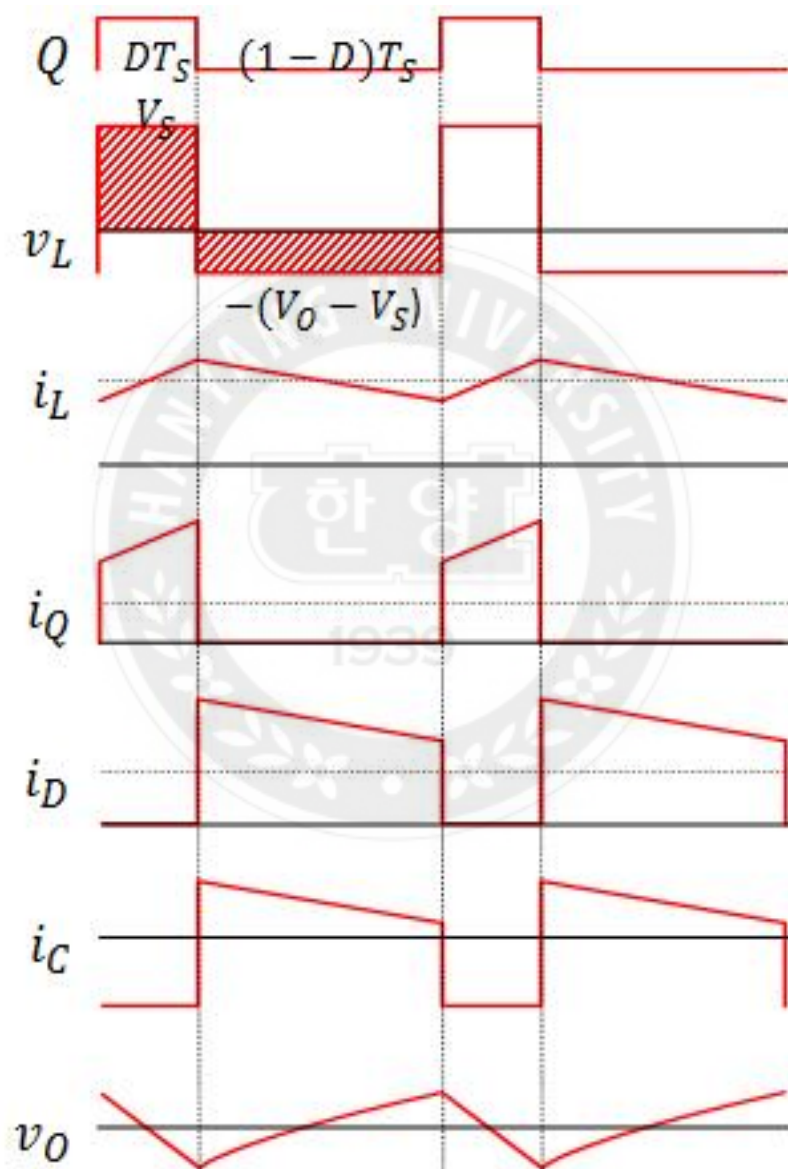


Fig.3.4. 부스트 컨버터 스위치 ON/OFF 상태에 따른 동작 파형

3.1.2 Switch OFF 상태

부스트 컨버터를 출력전압과 인덕터 전류를 state로 하는 상태방정식으로 표현하기 위해서 각각의 상태에 따른 등가회로로부터 출력전압과 인덕터 전류 미분방정식을 얻을 수 있다. 부스트 컨버터 스위치 OFF 등가회로는 그림3.2로부터 그림3.5와 같이 나타낼 수 있다.

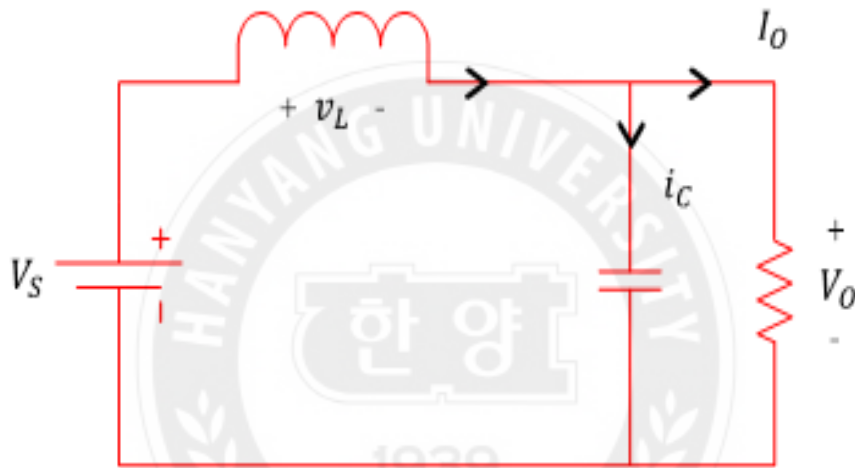


Fig.3.5. 부스트 컨버터 스위치 OFF 등가회로

상태방정식의 state는 다음과 같이 정의한다.

$$x = \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_c \\ i_L \end{bmatrix}$$

즉 state는 커패시터의 전압과 인덕터의 전류로 나타낼 수 있다.

스위치 OFF 등가회로의 키르히호프 전압법칙과 전류법칙으로부터 커패시터 전압과 인덕터 전류를 정의할 수 있다.

$$KVL : V_s - V_o = V_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad (1)$$

$$KCL : i_c = i_L - I_o = C \frac{dV_o}{dt} = C \frac{dV_c}{dt} (\because V_o = V_c) \quad (2)$$

인덕터 전류는 출력 전압과 인덕터 전압의 관계식으로부터 (1)식과 같이 정의되며, 출력 전압은 출력 전류와 커패시터 전압의 관계식으로부터 (2)식과 같이 정의할 수 있다. 위 수식으로부터 상태방정식을 얻기 위해 출력 전압과 인덕터 전류의 미분방정식으로 나타내면 (3), (4) 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_L - I_o}{C} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (4)$$

(3), (4)식은 (5)식과 같이 정리할 수 있으며, (6), (7)식과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_o}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \\ \frac{V_s - V_o}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_s \quad (5)$$

$$x = A_{off}x + B_{off}V_s \quad (6)$$

$$y = C_{off}x \quad (7)$$

(6), (7) 식에서 정의된 행렬은 값은 다음과 같다.

$$A_{off} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}, B_{off} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, C_{off} = [1 \ 0] \text{의 값을 가지며, } C$$

행렬의 경우 출력 전압을 측정하는 전압 센서를 의미한다.



3.1.3 Switch ON 상태

마찬가지로 부스트 컨버터 스위치 ON 등가회로는 그림3.3으로부터 그림3.6과 같이 나타낼 수 있으며, 앞서 등가회로에서 키르히호프 전압법칙과 전류법칙으로부터 정의된 state의 미분방정식을 구하면 (8), (9) 식을 얻을 수 있다.

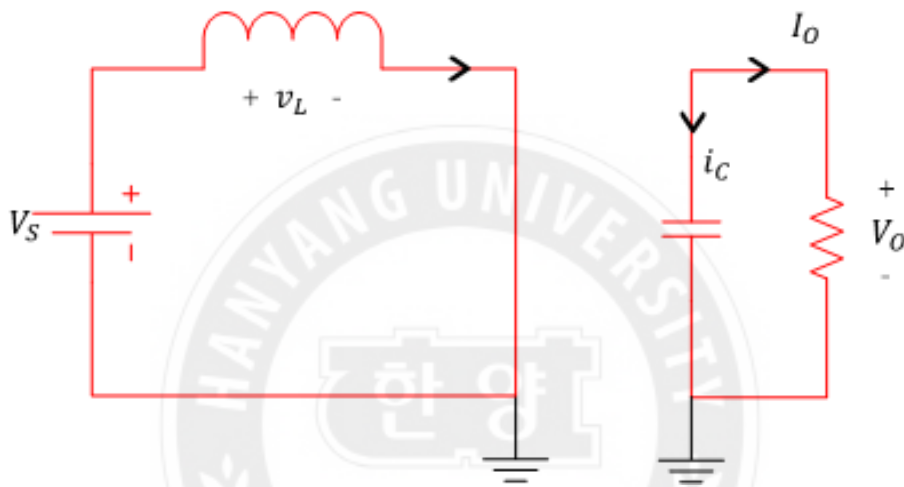


Fig.3.6. 부스트 컨버터 스위치 ON 등가회로

$$KVL : V_s = V_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad (8)$$

$$KCL : i_c = -I_o = C \frac{dV_o}{dt} = C \frac{dV_c}{dt} \quad (9)$$

위 수식으로부터 상태방정식을 얻기 위해 출력 전압과 인덕터 전류의 미분방정식으로 나타내면 (10), (11) 식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (10)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{-I_o}{C} = -\frac{V_o}{RC} \quad (11)$$

(10), (11)식은 (12)식과 같이 정리할 수 있으며, (13), (14)식과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_o}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_o}{RC} \\ \frac{V_s}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_s \quad (12)$$

$$\dot{x} = A_{on}x + B_{on}V_s \quad (13)$$

$$y = C_{on}x \quad (14)$$

(13), (14) 식에서 정의된 각 행렬의 값은 다음과 같다.

$$A_{on} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{on} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, C_{on} = [1 \ 0]$$

3.1.4 부스트 컨버터 모델링

부스트 컨버터의 각 동작에 따른 상태방정식을 하나의 상태방정식으로 정의하기 위해 스위칭 입력을 $u(t)$ 라고 정의한다. 스위칭 상태에 따른 값은 스위치 ON 상태에서 $u(t) = 1$, OFF 상태에서 $u(t) = 0$ 값을 가진다. 이와 같이 스위칭 신호가 인가된다고 할 때 부스트 컨버터의 상태방정식은 (15), (16)식과 같이 정의할 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dV_o}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = [u(t) \cdot A_{on} + (1 - u(t)) \cdot A_{off}]x + [u(t) \cdot B_{on} + (1 - u(t)) \cdot B_{off}]V_s \quad (15)$$

$$y = [u(t) \cdot C_{on} + (1 - u(t)) \cdot C_{off}]x \quad (16)$$

위 상태방정식에서 스위칭 입력을 시간에 따른 함수가 아닌 스위칭 OFF 시간에 대한 스위칭 ON 시간의 비인 듀티비로 표현하여 (17), (18)식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = [u \cdot A_{on} + (1 - u) \cdot A_{off}]x + [u \cdot B_{on} + (1 - u) \cdot B_{off}]V_s \quad (17)$$

$$y = [u \cdot C_{on} + (1 - u) \cdot C_{off}]x \quad (18)$$

따라서 부스트 컨버터의 최종 상태방정식은 (19)식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bxu + G \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (19)$$

정의된 각 행렬의 값은 다음과 같이 주어진다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], G = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_s}{L} \end{bmatrix}$$

이 때, 입력 U (스위칭 입력)을 설계함으로써 출력 전압을 제어한다. 하지만 위 모델은 부스트 컨버터의 이상적인 모델이며, 위 상태방정식으로 부스트 컨버터를 제어할 경우 제어 오차 및 추정 오차가 발생한다.

본 연구의 경우 제어 오차가 결국 에너지 효율 감소로 이어지기 때문에 각 소자(다이오드, MOSFET 등)의 특성을 반영한 상태방정식이 필요하다.



3.1.5 소자 특성을 고려한 부스트 컨버터 모델링

부스트 컨버터의 다이오드 순방향 전압과 MOSFET on-저항을 고려하면 그림3.7, 그림3.8과 같이 등가회로로 나타낼 수 있다. 추정기와 제어기 설계의 경우 이상적인 모델을 기준으로 설계하고, 시뮬레이션 모델의 경우 추정기의 오차와 제어 오차를 줄이기 위해 소자의 특성이 고려된 두 회로에 대하여 상태방정식을 정의하여 사용한다.

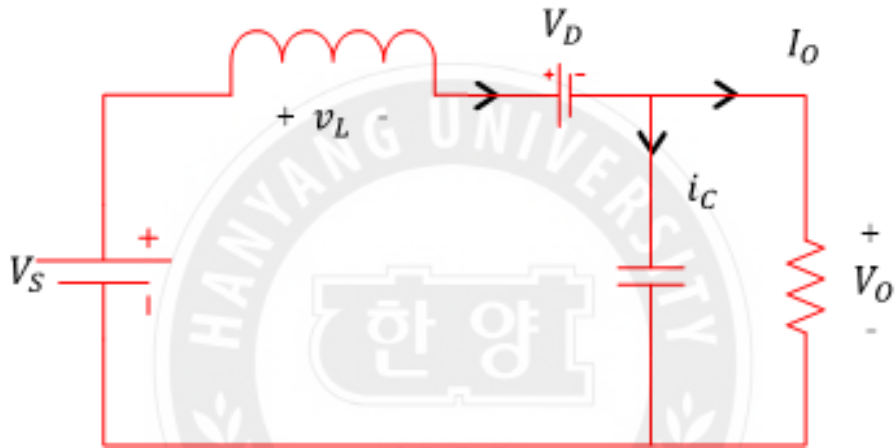


Fig.3.7. 소자 특성을 고려한 부스트 컨버터 스위치 OFF 등가회로

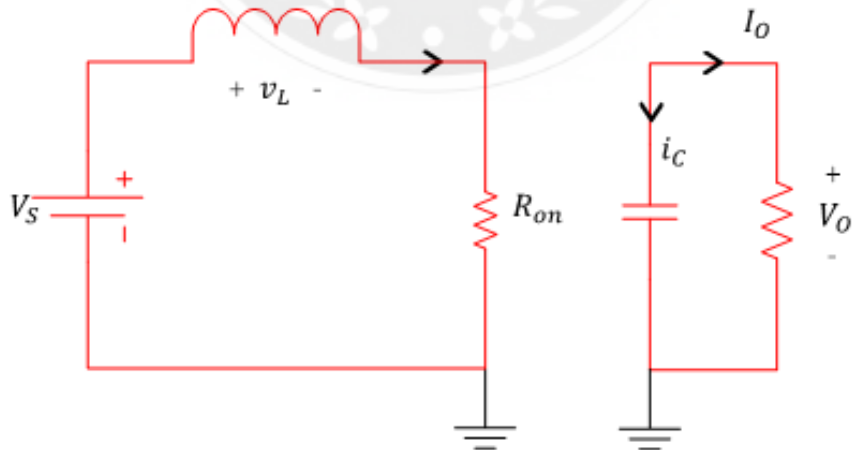


Fig.3.7. 소자 특성을 고려한 부스트 컨버터 스위치 ON 등가회로

부스트 컨버터의 스위치 OFF 상태에서는 다이오드 DC전압으로 모델링 할 수 있으며, 이 때 출력 전압과 인덕터 전류의 미분 식으로 나타내면 (20), (21) 식을 얻을 수 있다.

$$KVL : V_s - V_o - V_D = V_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad (20)$$

$$KCL : i_c = i_L - I_o = C \frac{dV_o}{dt} = C \frac{dV_c}{dt} (\because V_o = V_c) \quad (21)$$

위 수식으로부터 출력 전압과 인덕터 전류의 미분방정식으로 나타내면 (22), (23) 식으로 정리할 수 있으며, 두 수식으로부터 상태방정식 (24)식을 정의할 수 있다.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o - V_D}{L} \quad (22)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_L - I_o}{C} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_o}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_o}{RC} \\ \frac{V_s}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_s + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V_D}{L} \end{bmatrix} \quad (24)$$

정의되

$$\dot{x} = A_{off}x + B_{off}V_s + G_{off} \quad (25)$$

$$y = C_{off}x \quad (26)$$

(25), (26) 식에서 정의된 각 행렬의 값은 다음과 같다.

$$A_{off} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{off} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, C_{off} = [1 \ 0], G_{off} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V_D}{L} \end{bmatrix}$$

또한, 부스트 컨버터의 스위치 ON 상태에서는 MOSFET은 저항으로 모델링 할 수 있으며, 이 때 MOSFET의 on-저항을 고려한 출력 전압과 인덕터 전류의 미분 식으로 나타내면 (27), (28) 식을 얻을 수 있다.

$$KVL : V_s - i_L R_{on} = V_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad (27)$$

$$KCL : i_c = -I_o = C \frac{dV_o}{dt} = C \frac{dV_c}{dt} \quad (28)$$

위 수식으로부터 출력 전압과 인덕터 전류의 미분 식으로부터 (29)식 상태방정식을 얻을 수 있으며 (30), (31)식으로 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{dV_o}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_o}{RC} \\ \frac{V_s}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{on}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_s \quad (29)$$

$$\dot{x} = A_{on}x + B_{on}V_s \quad (30)$$

$$y = C_{on}x \quad (31)$$

(30), (31) 식에서 정의된 각 행렬의 값은 다음과 같다.

$$A_{on} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{on}}{L} \end{bmatrix}, B_{on} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, C_{on} = [1 \ 0]$$

3.1.3절과 같은 방법으로 부스트 컨버터의 각 동작에 따른 상태방정식을 하나의 상태방정식으로 정의하면 부스트 컨버터의 다이오드 특성과 MOSFET 특성을 고려한 상태방정식인 (32), (33)식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B_1xu + B_2u + G \quad (32)$$

$$y = Cx \quad (33)$$

(32), (33) 식에서 정의된 각 행렬의 값은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_{on}}{L} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V_D}{L} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0],$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_s - V_D}{L} \end{bmatrix}$$

컨버터 제어 시뮬레이션에서는 실제 컨버터 회로가 아닌 정의된 (32), (33)수식 모델을 사용한다.

3.2 부스트 컨버터 제어

이 장에서는 컨버터를 제어하기 위해 모델링한 부스트 컨버터의 상태방정식으로부터 인덕터의 전류를 추정하는 추정기와 부스트 컨버터의 출력전압을 제어하는 제어기를 설계한다. 추정기와 제어기는 안정성과 시스템이 요구하는 성능을 만족하도록 설계되어야 한다. 여기서 안정성이란 실제 인덕터의 전류 값과 추정된 인덕터 전류 값의 차이, 즉 추정 오차가 0이 되는 것을 의미하며, 제어기 또한 출력 전압과 reference 전압 값의 오차가 0이 되는 것을 의미한다. 시스템 성능이란 오차가 0으로 수렴하는데 있어 오버슈트, 상승시간, 지연 시간 등 시스템이 요구하는 성능을 만족해야 한다.

본 연구에서는 모델링한 부스트 컨버터를 Output feedback 제어 방식으로 추정기와 제어기를 설계한다.

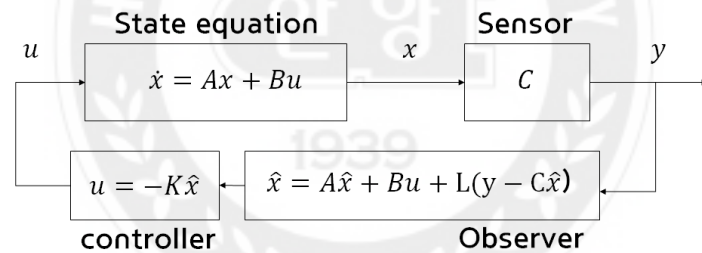


Fig.3.8. Output feedback control

인덕터의 전류를 측정하기 위해서는 Shunt, CT, Hall effect current 등의 전류센서가 필요하다. 이러한 전류센서는 센서의 가격, 에너지를 소모, 소자의 부피(트랜스포머 등), 센서의 노이즈 등을 고려하여 추정기를 사용한다.

3.2.1 추정기 설계

추정기는 인덕터에 흐르는 전류를 센서로 측정하지 않고, 측정한 출력전압과 모델링한 부스트 컨버터의 상태방정식으로부터 인덕터 전류 값을 추정한다. 추정기의 설계는 그림3.9와 같이 설계할 수 있으며, 실제 인덕터의 전류와 추정된 값의 오차가 0이 되도록 설계한다.

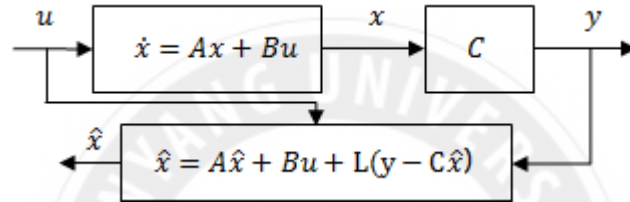


Fig.3.9. Observer design

추정기(Observer)는 (34), (35)식과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{x}u + G + L(Cx - C\hat{x}) \quad (34)$$

$$y = C\hat{x} \quad (35)$$

이 때, 추정된 출력전압과 인덕터 전류 값은 $\hat{x} = [\hat{V}_o \ \hat{i}_L]^T$ 으로 정의한다.

또한 $L = [l_1 \ l_2]^T$ 인 Observer 이득행렬이며, 적절한 L 값을 설계함으로써 추정 오차를 0으로 수렴하도록 설계할 수 있다. 수렴 오차는 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 으로 정의하면, Observer의 error dynamics를 (19)식과 (34) 식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x} + B\tilde{x}u \quad (36)$$

3.2.2 제어기 설계

제어기의 설계는 제어 오차를 0으로 수렴하도록 하는 제어 입력 U 를 설계한다. 제어기를 설계하기에 앞서 우선 제어 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e = \hat{x} - x_d = \begin{bmatrix} \hat{V}_o - V_{ref} \\ \hat{i}_L - i_{ref} \end{bmatrix}$$

제어 오차에 대한 미분은 식 (34)과 reference의 미분 값으로부터 (37)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e} = \dot{\hat{x}} - \dot{x}_d = A\hat{x} + B\hat{x}u + G + L(Cx - \hat{C}\hat{x}) - \dot{x}_d \quad (37)$$

이 때, (38)식과 같이 제어 입력 U 를 설계한다.

$$u = (b^T b)^{-1} b^T (-Ke - Ax_d - G - L(Cx - \hat{C}\hat{x}) + \dot{x}_d) \quad (38)$$

여기서 $b = B\hat{x}$ 이며, 이 행렬은 역행렬이 존재하지 않는다. 따라서 (38)식과 같이 Pseudo inverse 항을 정의한다. 또한 K 행렬은 positive definite 행렬이다.

설계한 제어 입력 (38)식을 (37)식에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = (A - K)e$$

위 식은 부스트 컨버터의 출력 전압을 제어하는 제어기의 error dynamics이며, 이 식으로부터 제어 오차가 0으로 수렴하는 K 값을 설계할 수 있다.

인덕터의 전류를 추정하는 추정기와 컨버터의 출력 전압을 제어하는 제어기의 이득행렬을 정하는데 있어 안정성은 다음 장에서 검증한다.

3.2.3 추정기와 제어기의 안정성 검증

추정기와 제어기의 error dynamics으로부터 각 단계의 안정성을 검증한다. 여기서 안정성이란 error 가 0으로 수렴하는 것을 의미하며 이 때, 얼마나 빠르게 수렴하는가 하는 것은 성능을 의미한다.

안정성 검증 방법은 Lyapunov 정리 안정성 검증 방법을 이용한다. 우선 Lyapunov candidate를 다음과 같이 선정한다.

$$V = \tilde{x}^T P \tilde{x} + e^T e$$

여기서 P 행렬은 positive definite 행렬이며, $\tilde{x}^T P \tilde{x}$ 항은 추정기의 오차와 관련된 항이며, $e^T e$ 항은 제어기 오차와 관련된 항이다.

Lyapunov candidate인 V 의 시간 미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} = \dot{\tilde{x}}^T P \tilde{x} + \tilde{x}^T P \dot{\tilde{x}} + \dot{e}^T e + e^T \dot{e}$$

제어기와 추정기의 안정성을 보장하기 위해서는 $\dot{V} < 0$ 을 만족해야 한다. 위 식은 다음과 같이 정리 할 수있다.

$$\dot{V} = \tilde{x}^T P(A-LC) + (A-LC)^T P \tilde{x} + 2\tilde{x}^T P B \tilde{x} u + 2e^T (A-K)e < 0$$

이 때, 각 항을 나눠 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}^T P(A-LC) + (A-LC)^T P \tilde{x} + 2\tilde{x}^T P B \tilde{x} u &< -Q \\ 2e^T (A-K)e &< 0 \end{aligned} \quad (39)$$

여기서 Q 행렬은 positive definite 인 행렬이며, (38)식을 만족하는 observer 이득행렬 $L = [l_1 \ l_2]^T$ 값을 얻는다. 마찬가지로 제어 이득행렬 K 는 (39)식을

만족하는 값을 얻는다. 즉, 이렇게 얻은 observer 이득행렬과 제어 이득행렬을 사용함으로써 추정 오차와 제어 오차가 0으로 수렴하도록 설계할 수 있다. 즉 시스템의 안정성을 보장할 수 있다.



3.3 보조배터리 방전 전류 제어

이 장에서는 듀얼배터리 시스템에서 컨버터 제어를 통해 보조배터리의 방전 전류를 제어하는 메커니즘과 회로 설계 및 동작을 설명한다.

3.3.1 방전 전류 메커니즘

2장의 듀얼배터리 시스템에서 기존 배터리(Pb)와 추가된 보조 배터리(Li+)는 각각 자동차의 전기부하에 전력을 공급한다. 하지만 배터리의 특성인 C-rate 효과를 고려한 배터리의 효율(사용시간)을 향상시키기 위해서는 각 배터리의 방전 전류의 제어가 필요하며, 아래와 같이 두 가지 경우가 존재한다.

- 1) 기존 배터리와 보조배터리의 방전 전류를 개별적으로 제어
- 2) 하나의 배터리만 방전 전류를 제어

배터리의 효율 향상을 위한 본 연구에서는 제어 과정에서 소모되는 전력량을 최소화하기 위해 2)의 방법을 사용하여 보조배터리의 방전 전류만을 제어함으로써, 자동차의 전기부하에 필요한 전력량을 기존배터리와 분배하여 공급하여 기존배터리의 방전 전류까지 제어하는 시스템을 구성한다.

2장의 듀얼 배터리 시스템에서 보조배터리의 방전 전류를 제어하는 회로를 설계 다음 그림.3.8과 같이 구성한다. 이 때, 자동차의 전기부하에 필요한 전력량 공급은 보조배터리의 전력 공급량과 기존 배터리의 전력 공급량의 합으로 나타낼 수 있으며, 전기부하는 저항으로 모델링한다.

따라서, 전기부하에서 소모되는 전류는 (40)식으로 표현할 수 있다.

$$I_o = I_{s1} + I_{s2} \quad (40)$$

이 때, I_{s1} 은 기존 배터리에서 부하에 공급하는 전류이며, I_{s2} 는 보조배터리 방전 전류 제어를 통해 공급되는 전류를 의미한다.

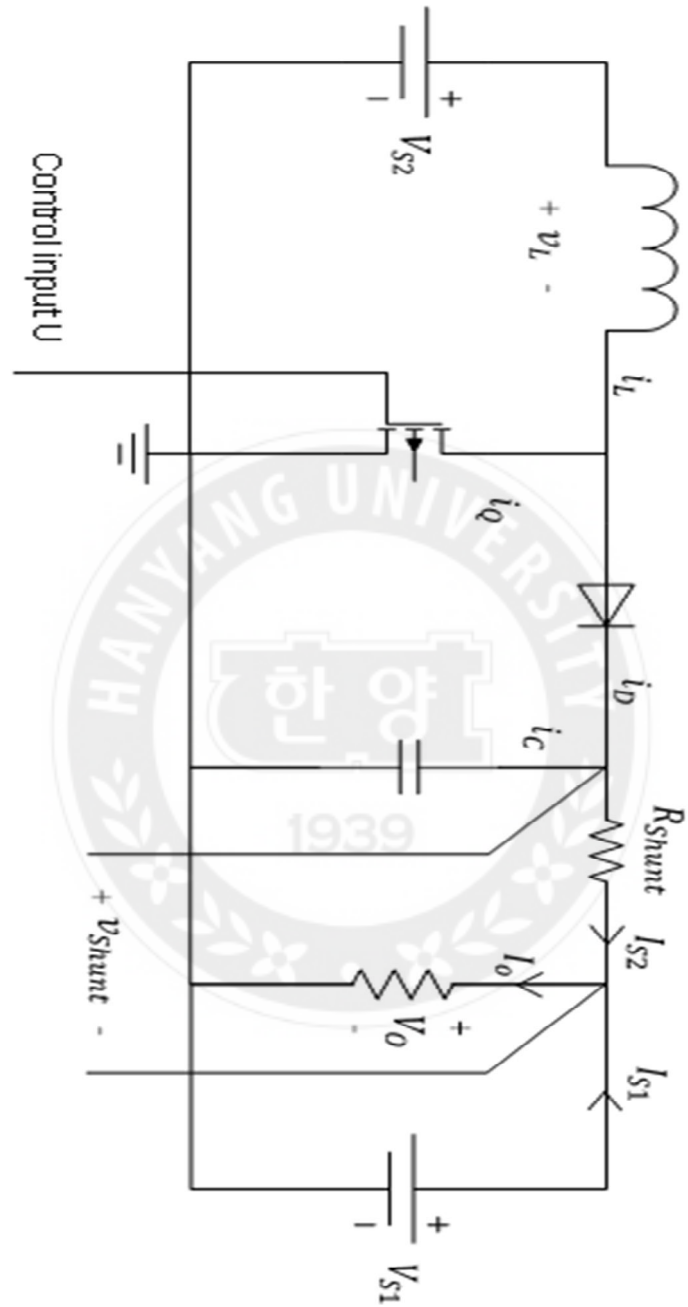


Fig.3.8. 보조배터리 방전 전류 제어 회로

이 때, I_o 는 자동차의 전기부하에서 소모하는 전류를 의미하며, I_{s1} 은 기존 배터리에서 부하에 공급하는 전류, I_{s2} 는 컨버터 제어를 통해 보조배터리의 방전 전류를 제어하여 공급하는 전류를 의미한다.

$$I_{s2} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} = \frac{V_{cont} - V_{s1}}{R_{shunt}} \quad (41)$$

이 때, V_{shunt} 는 (41)식으로 나타낼 수 있으며 V_{cont} 는 부스트 컨버터의 제어기를 통해 제어되는 전압을 의미한다. 즉 Shunt 저항에 걸리는 전압은 Pb 배터리 전압인 V_{s1} 과 부스트 컨버터의 전압제어에 의해 정해진다. 기존 배터리인 자동차의 Pb 배터리의 전압은 완충 상태 또는 방전 상태에 따라 달라지며, 완충 상태에서는 약 ~14.4V, 방전 시에는 방전 전류의 크기에 따라 공칭 전압(nominal voltage)이 달라진다. 배터리의 전압은 내부 온도 등 비선형적 요소에 의해 변하지만, 충방전 시 배터리의 전압에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 충전 시 충전 전압 또는 방전 시 방전 전류이다. 하지만 이 때, 큰 차이는 발생하지 않으며 공칭 전압은 약 12V를 유지하는 DC 전원으로 모델링 할 수 있다. 즉 기존 배터리의 방전 전류는 옴의 법칙에 따라 정해진다. 이 때, 자동차의 전기부하 또한 전류가 흐름에 따라 온도 변화가 발생하게 되고 이는 저항의 변화를 가져온다. 하지만 일정 온도가 유지됨에 따라 DC저항으로 모델링이 가능하다. 예를 들면 열선 시트, LED 등의 전기부하는 열에 의한 저항이 급격하게 변하지만 이후 일정한 값으로 수렴한다.

즉, 그림3.8에서 보조배터리가 없다면 기존 배터리의 방전 전류는 제어할 수 있는 대상이 아니다. 하지만 컨버터의 MOSFET 스위칭을 제어함으로써 보조 배터리의 방전 전류를 제어할 수 있고, 이는 기존 배터리의 방전 전류 역시 제어됨을 의미한다. 기존에는 자동차의 전기부하에 필요한 전력을 알터네이터가 공급하고, 과부하 시에만 배터리의 전력을 공급하는 것이 일반적이다. 하지만 최근 자동차 정차 시 엔진의 공회전을 막아 연비를 향상시키는 ISG(Idle Stop&Go) 시스템의 경우, 정차 시 전기부하의 필요전력을 배터리에서 공급한다. 이 때, 배터리의 SOC 등 상태를 고려하여 배터리에서 전력을 공급할 시

배터리의 문제 발생이 예측되는 경우 자동차의 정차 시에도 ISG 시스템을 작동시키지 않는다. 즉 본 연구는 보조배터리의 방전 전류를 제어함으로써 단순히 배터리의 효율(사용 시간)을 향상시키는 것뿐만 아니라 자동차의 전력시스템의 효율 향상 및 안정성 향상을 기대할 수 있다.



제4장 알고리즘

이 장에서는 부스트 컨버터 제어에서 reference 값을 결정하는 알고리즘의 목표를 설명하고, 알고리즘을 구현한다. 여기서 reference 값이란 컨버터의 출력 전압을 결정하는 값을 의미한다. 즉 컨버터의 출력 전압은 보조배터리의 방전 전류를 의미하고, 따라서 reference값은 보조배터리의 방전 전류를 결정하는 파라메타이다.

4.1 알고리즘 목표

알고리즘의 목표는 본 연구의 목표인 기존 배터리와 추가된 보조배터리의 총 사용시간 향상과 기존 배터리의 방전 상황을 고려 안정성 향상 위한 보조배터리와 기존배터리의 방전 전류를 결정하는 것이 주 목표이다.

이 때, 배터리의 방전 시 특성인 C-rate 효과를 고려하여 각 배터리의 효율(사용 시간)을 향상시킨다. C-rate 효과를 고려 시 기존 배터리와 보조배터리의 스펙(배터리의 종류, 전압, 용량 등)이 동일하다면 reference 값을 결정하는 알고리즘은 중요하지 않다. 동일 스펙의 듀얼 배터리를 사용할 경우 자동차의 전기부하의 필요 전력이 정해졌을 때 각 배터리에서 필요 전력의 절반을 공급하는 것이 C-rate 효과만을 고려했을 시 배터리의 사용시간을 가장 오랫동안 사용할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 종류가 다른 듀얼 배터리 시스템을 구성한다. 자동차의 기존 배터리는 납산 배터리이며, 추가되는 보조배터리는 에너지 밀도가 큰 리튬이온 배터리를 사용한다. 또한 보조배터리의 용량은 태양 전지의 출력으로 충전되는 것을 고려하여 용량을 선정한다. 즉 기존 배터리와 추가되는 보조배터리는 배터리의 종류뿐만 아니라 배터리의 전압, 용량 등 차이가 크다. 따라서 일반적으로 자동차의 전기부하에 필요한 전력을 절반씩 공급하는 것은 배터리의 사용 시간 향상에 크게 도움이 되지 않는다.

즉, 종류가 다른 듀얼 배터리 시스템에서 듀얼 배터리의 사용 시간 향상을 위해 각 배터리의 방전 전류를 결정해야 한다.

4.2 알고리즘 구현

알고리즘이 위 목표를 만족시키는 reference 값을 결정하기 위해 배터리의 정보와 보조배터리를 충전시키는 추가 전원에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서 가장 중요한 배터리 정보는 각 배터리의 SOC(State of Charge)이다.

배터리의 SOC 정보는 배터리를 관리함에 있어 매우 중요한 파라메타이나, 이를 정확하게 측정하는 방법은 없다. 따라서 SOC를 측정하는 것이 아닌 추정(Estimation)하는 방법이 많이 연구되고 있으며, 추정하는 방법 또한 다양하다. 하지만 자동차의 배터리처럼 주행 중 항상 충방전되는 상황에서 정확하게 추정하는 것은 불가능하다. 특히 배터리의 반복 사용에 의해 노화가 진행됨에 따라 배터리의 사용 가능 용량 등 성능이 떨어질 뿐만 아니라 SOC 추정의 정확도 역시 떨어지게 된다.

Categories	Mathematical methods
Direct measurement	(i) Open circuit voltage method
	(ii) Terminal voltage method
	(iii) Impedance method
	(iv) Impedance spectroscopy method
Book-keeping estimation	(i) Coulomb counting method
	(ii) Modified coulomb counting method
Adaptive systems	(i) BP neural network
	(ii) RBP neural network
	(iii) Support vector machine
	(iv) Fuzzy neural network
	(v) Kalman filter
Hybrid methods	(i) Coulomb counting and EMF combination
	(ii) Coulomb counting and Kalman filter combination
	(iii) per-unit system and EKF combination

Table.4.1. SOC를 추정하는 수학적 방법의 분류

SOC 추정방식은 다음과 같이 분류할 수 있다. 1) Direct measurement 방법은 배터리의 전압 및 임피던스와 같은 물리적인 특성을 사용하여 SOC를 추정하는 방법이다. 2) Book-keeping estimation 방법은 방전 전류를 입력으로 사용하는 방법으로 방전 전류를 적분하여 SOC를 계산하는 방법이다. 3) Adaptive systems 방법은 다양한 방전 전류 조건에서 자동적으로 조정되는 방법이다. 4) Hybrid method 방법은 각 SOC 추정 방식의 이점으로부터 최적의 SOC를 추정성능을 가지는 방식이다. 이 방식은 각 SOC의 추정 방법과 비교하여 일반적으로 더 좋은 성능을 보여준다.

이러한 SOC 추정 방식과 오차를 고려했을 때 단순히 배터리의 SOC 정보로부터 알고리즘을 구현하는 것은 결과적으로 듀얼 배터리 시스템의 효율에도 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 1차적으로 각 배터리의 SOC 정보로부터 판단한 후, 2차적으로 각 배터리의 SOC 변화량으로부터 판단할 수 있도록 그림.4.1과 같이 알고리즘을 구현한다. 이는 실제 정확하지 않은 SOC 값이 추정되어 전체 시스템의 효율에 미치는 영향을 최소화한다.

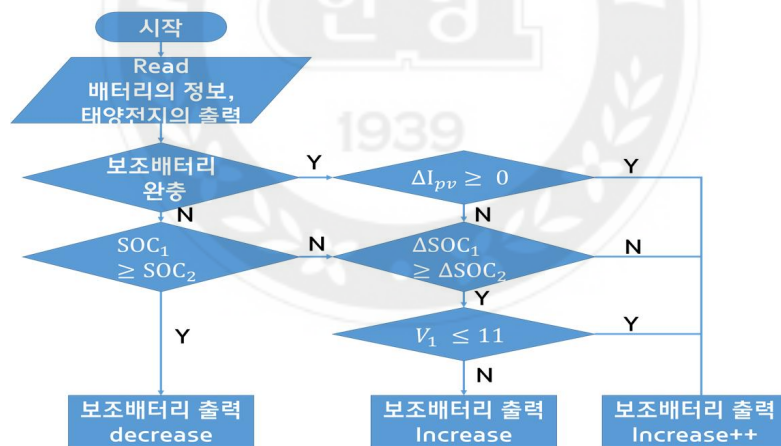


Fig.4.1. 보조배터리 방전 전류 제어 알고리즘

또한 자동차의 주행 중 기존 배터리가 방전되는 경우는 자주 발생하지 않지만 기존 배터리의 경우 한번 방전될 경우 배터리의 안정성뿐만 아니라 수명에도 큰 영향을 미친다. 따라서 기존 배터리의 방전 상황을 고려하여 보조배터리의 출력을 증가시킴으로써 기존 배터리의 안정성을 확보하도록 알고리즘을

구현하였다.

이 때, 보조배터리는 기존배터리와 달리 추가 전력원에 의해 충전되는 배터리로 보조배터리에 완충 상태와 충전 상태를 고려하여 충전 중 낭비되는 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 알고리즘을 구현한다.

Parameters	Description
SOC_1	기존 배터리의 SOC
SOC_2	보조 배터리의 SOC
V_1	기존 배터리의 출력 전압
ΔSOC_1	기존 배터리의 SOC 변화량
ΔSOC_2	보조 배터리의 SOC 변화량
ΔI_{pv}	추가 전력원의 출력 변화량 (ex 태양전지 등)

Table.4.2. 알고리즘 파라미터

제5장 시뮬레이션 결과

이 장에서는 보조배터리의 방전 전류 값을 결정하는 알고리즘과 보조 배터리가 결정된 reference 값을 추종하도록 하는 제어기를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

5.1 알고리즘 구동 결과

알고리즘 구동 결과는 초기 SOC가 다른 듀얼 배터리가 알고리즘 목표인 SOC 동일하게 유지하면서 자동차의 전기부하에 전력을 공급하는지 검증한다.

시뮬레이션 검증에 사용된 배터리의 종류와 파라미터들은 Table. 5.1 과 같다. 기존 배터리인 Pb 배터리는 아반떼 급 배터리를 사용했으며, 보조배터리인 Li-ion 배터리는 태양전지의 출력을 고려하여 용량을 선정하였다.

	Pb battery	Li-ion battery
Nominal voltage	12V	11.1V
Rated capacity	60Ah	26Ah
Rated current	•	12A
Initial SOC	100	90

Table.5.1 Battery Parameters

일반적으로 기존 배터리인 Pb 배터리는 알터네이터에 의해 항상 충전되어 있는 상태를 가정하여 SOC를 100으로 가정했으며, 태양전지의 출력으로부터 충전되는 Li-ion 배터리는 90으로 가정하여 시뮬레이션을 진행한다.

알고리즘 구동 결과는 그림 5.1 과 같다.

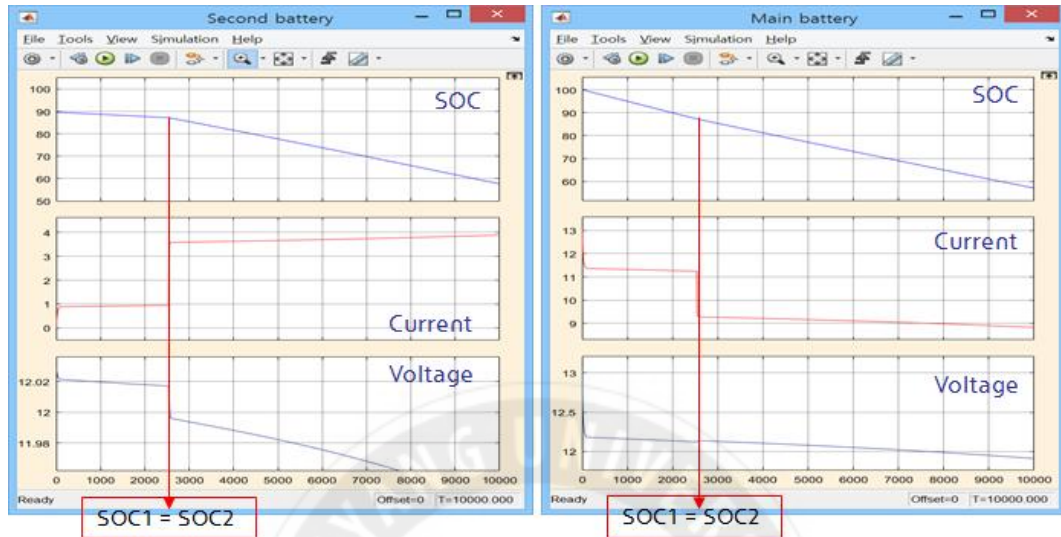


Fig.5.1 알고리즘 구동 결과

초기 SOC 와 배터리 parameter가 다른 두 종류의 배터리로 구성된 듀얼 배터리 시스템에서 알고리즘 구동 결과 일정 시간 이후 각 배터리의 SOC가 동일해 진다. 기존 배터리와 보조배터리의 SOC가 같아지는 시간 이후부터는 알고리즘 목표와 같이 계속 동일하게 SOC를 유지하면서 자동차의 전기부하에 전력을 공급함을 검증한다.

5.2 연구 목표 결과 검증

이 장에서는 연구 목표인 각 배터리의 사용 효율(사용 시간) 향상을 검증한다. 배터리의 파라미터는 알고리즘 검증에 사용한 배터리와 동일하며, 초기 SOC 상태는 모두 100으로 가정한다. 초기 상태를 100으로 가정하는 이유는 이후 H/W 실험 환경에서 검증하기 위해서는 완충된 배터리의 상태로 실험하는 것이 가장 정확하기 때문이다. SOC의 추정은 항상 오차가 존재하고, 배터리를 정확한 SOC 상태로 가정하기 위해서는 완충상태가 유일하다.

검증 방법은 다음과 같이 각 상황에서의 배터리 사용 시간을 측정하고 비교한다.

- 1) Pb 배터리와 Li-ion 배터리를 개별적으로 사용
- 2) 본 연구의 듀얼 배터리 시스템을 구성하고, 각 배터리의 방전 전류 제어를 통한 배터리 사용

Pb 배터리와 Li-ion 배터리를 개별적으로 사용했을 때 각 배터리의 사용 시간은 그림 5.2와 같다. 이 방식은 자동차의 전기부하에 Pb 배터리로 전력을 공급 한 후 방전 시 Li-ion 배터리로 전력을 공급하는 방식이다.

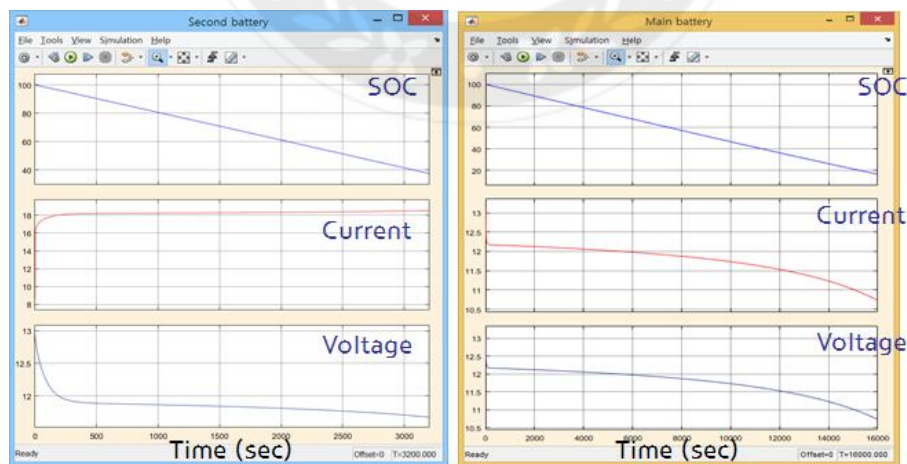


Fig.5.2 개별 사용 시 배터리 사용시간

본 연구의 듀얼 배터리 시스템을 구성하고 각 배터리의 방전 전류를 알고리즘에서 결정하고 제어하여 배터리를 동시에 사용했을 때 배터리 사용시간은 그림 5.3 과 같다.

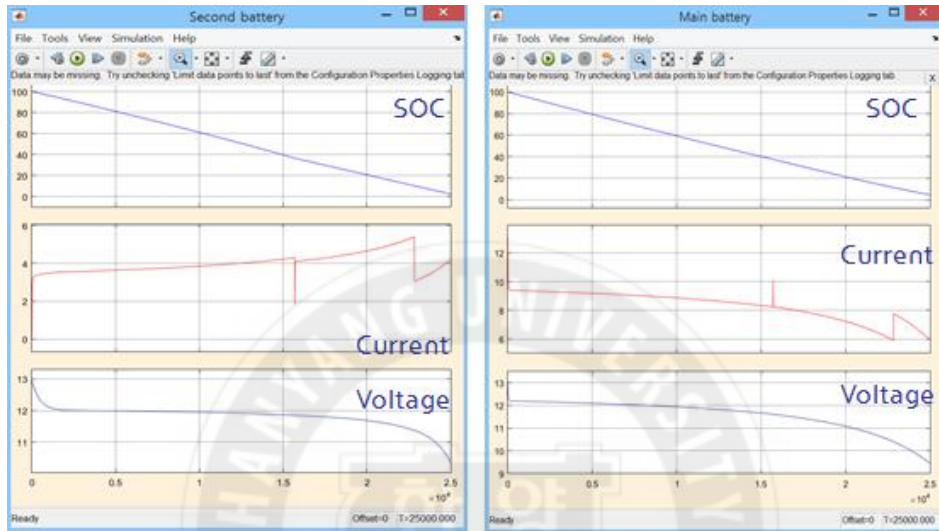


Fig.5.3 듀얼 배터리 시스템 적용 시 배터리 사용시간

이 때, 각 방식에 대한 배터리 사용 시간은 Table 5.2와 같다. 1)의 방식은 배터리를 개별적으로 사용하기 때문에 각각의 시간을 합하며, 듀얼 배터리 시스템의 경우 각 배터리를 동시에 사용하기 때문에 총 배터리 사용 시간으로 비교한다.

	개별 사용 시	듀얼 배터리 시스템
Pb	4.34 hr	5.56 hr
Li-ion	0.93 hr	
합 계	5.27 hr	5.56 hr

Table.5.2 배터리 사용시간 비교

배터리의 사용 시간 비교 결과 본 연구에서 제안한 듀얼 배터리 시스템 구성 후 배터리의 사용 시간이 약 8% 정도 향상된 것을 확인할 수 있다.

배터리의 방전 특성 상 자동차의 풀 부하 영역에서 구동한다면 본 연구의 배터리 효율 향상 효과는 더욱 증가할 것으로 기대할 수 있다.



제6장 결 론

본 논문에서는 기존의 자동차 배터리와 추가된 보조배터리의 듀얼 배터리 시스템을 구성하고, 배터리의 방전 특성을 고려한 각 배터리의 효율을 향상시키기 위해 컨버터를 활용한 제어 방식을 제안하였다. 제안한 컨버터 제어 방식을 보조배터리의 방전 전류를 제어함으로써, 자동차의 전기부하에 필요한 전력을 기존 배터리와 분담하여 공급한다. 즉, 기존 배터리 또한 보조배터리의 방전 전류가 제어됨에 따라 기존 배터리의 방전 전류도 결정된다.

각 배터리의 사용 효율을 향상시키기 위한 방전 전류량은 배터리의 상태, 부하의 상태 등에 따라 알고리즘에서 결정된다. 보조배터리의 방전 전류량을 결정된 전류량이 되도록 부스트 컨버터를 통해 제어 된다.

본 논문에서는 종류가 다른 듀얼 배터리 시스템을 구성하고, 방전 전류를 제어하기 위한 컨버터를 설계하고, 방전 전류를 결정하는 알고리즘과 방전 전류를 제어하는 제어를 검증하였다. 이를 시뮬레이션을 통해 각 배터리의 효율 향상(사용 시간)을 검증하였다.

배터리의 방전 특성을 고려했을 때 전기부하의 소모 전력이 클수록 본 연구의 목표인 배터리 사용 효율은 증가한다. 즉, 자동차의 풀 부하 영역에서의 효율은 본 논문의 결과보다 증가할 수 있다.

이는 자동차의 전기부하 시스템의 효율 향상뿐만 아니라, 배터리의 상태에 따라 사용되는 Idle Stop&Go 시스템 등에도 영향을 미쳐 연비향상에도 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 선우 준, 2015, “2차 전지 Road to the TOP”, 서울
2. Gholam-Abbas Nazri, 2009, “LITHIUM BATTERIES Science and Technology”, General Motors R&D and Planning Center Warren, Michigan
3. Chi-Tsong Chen, 1999, “Linear system Theory and Design”, OXFORD UNIVERSITY PRESS
4. 조현기, 2015, “Sensorless-Nonlinear Control Method for DC-DC Boost converter”, 석사학위논문, 중앙대학교 대학원, 서울
5. Wen-YeauChang, 2013, “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review”, Hindawi Publishing Corporation
6. Wentao Jiang, and Chok You Chan, 2016, “A sliding-mode controller for a multilevel DC-DC boost converter”, IEEE Industrial Electronics Society Conference
7. Yu-Chien Hsu, Dan Chen, Sheng-Fu Hsiao, Hung-Yu Cheng, and Chun-Shih Huang, 2015, “Modeling of a DC boost converter behavior in PV system using finite state machines”, IEEE Electric Power Engineering Conference
8. Martina Látková, Peter Bracíník, Michal Baherník, Filip Suško, 2011, “Modeling and Control of a New Three-Input DC - DC Boost Converter for Hybrid PV/FC/Battery Power System”, IEEE Transactions on Power Electronics

ABSTRACT

Supplementary Battery Control for the enhancement of energy efficiency and system stability

Lee, Deokhee

Dept. of Automotive Electric Control Engineering
Graduate School of
Hanyang University

Recently, the electronic load system of automobiles tends to gradually increase ECUs which are essential devices for electronic control of automobiles as well as AVN(Audio, Video, Navigation) which are convenience systems. Consequently, the power system of automobiles has become increasingly important, and it is very important to supply power to the electric load of the automobiles stably. As a result, there are researches on additional power supply sources such as solar cells. These additional power supply sources are highly nonlinear depending on environmental conditions, and a battery is essential for use during driving.

In this paper, it propose discharge current control system of a battery that improves the efficiency of use of each battery by considering the characteristics of the battery. The capacity of the battery different from the actual capacity according to the temperature of the battery and the magnitude of the discharge current. In this paper, it propose a discharge current control method for a battery considering the characteristic that the capacity is displayed differently according to the discharging current of the battery. The auxiliary battery is selected as a Li-ion battery with a high energy density in consideration of weight increase of automobile and free space. Considering the rated voltage of automobiles and electric loads, a converter is used to control voltage and discharge current of Li-ion battery.

In this paper, it design an estimator to estimate the inductor current, and a controller to control the output voltage to control the discharge current of the auxiliary battery. In addition, this paper explains the mechanism for controlling discharge current, and provides circuit diagram and system configuration.

The dual battery system in this research is a system that determines

and controls the discharge current to improve the usage efficiency of each battery according to the state of the battery and the electric load of the automobiles.

Key words : Current control, boost converter, converter control,
Dual battery system

|



연구 윤리 서약서

본인은 한양대학교 대학원생으로서 이 학위논문 작성 과정에서 다음과 같이 연구 윤리의 기본 원칙을 준수하였음을 서약합니다.

첫째, 지도교수의 지도를 받아 정직하고 엄정한 연구를 수행하여 학위논문을 작성한다.

둘째, 논문 작성시 위조, 변조, 표절 등 학문적 진실성을 훼손하는 어떤 연구 부정행위도 하지 않는다.

셋째, 논문 작성시 논문유사도 검증시스템 "카피킬러"등을 거쳐야 한다.

2016년12월13일

학위명 : 석사

학과 : 자동차전자제어공학과

지도교수 : 윤상원

성명 : 이덕희



한 양 대 학 교 대 학 원 장 귀 하

Declaration of Ethical Conduct in Research

I, as a graduate student of Hanyang University, hereby declare that I have abided by the following Code of Research Ethics while writing this dissertation thesis, during my degree program.

"First, I have strived to be honest in my conduct, to produce valid and reliable research conforming with the guidance of my thesis supervisor, and I affirm that my thesis contains honest, fair and reasonable conclusions based on my own careful research under the guidance of my thesis supervisor.

Second, I have not committed any acts that may discredit or damage the credibility of my research. These include, but are not limited to : falsification, distortion of research findings or plagiarism.

Third, I need to go through with Copykiller Program(Internet-based Plagiarism-prevention service) before submitting a thesis."

DECEMBER 13, 2016

Degree : Master
Department : DEPARTMENT OF AUTOMOTIVE ELECTRONICS & CONTROL
ENGINEERING
Thesis Supervisor : Yoon, Sang Won
Name : LEE DEOKHEE


(Signature)